

**Beiträge zur Charakterisierung der
Strahlungsstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens*-
Genotypen unter Berücksichtigung morphologischer,
anatomischer und physiologischer Merkmale**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum horticumarum
(Dr. rer. hort.)

eingereicht an der
Lebenswissenschaftlichen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von Tina Langkamp (M.Sc.)

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät zu Berlin
Prof. Dr. Richard Lucius

Gutachter: 1. PD Dr. agr. Heiner Grüneberg
 2. Prof. Dr. Ludger Hendriks
 3. Prof. Dr. Andreas Bettin

Datum der mündlichen Prüfung: 27.05.2016

Widmung

Für meine Familie!

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens* Genotypen unter Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale. Von 2012 bis 2014 wurden Pflanzen von fünf *Impatiens* Genotypen bei unterschiedlichem Strahlungsangebot im Gewächshaus kultiviert. Zur Sensibilisierung des Pflanzenmaterials wurde ein Teil der Pflanzen während der Anzucht mit einer herkömmlichen Schattierung stark schattiert (70 % Lichtminderung). Nach 10 Wochen bei unterschiedlichem Strahlungsangebot wurden Blattproben für histologische Untersuchungen entnommen und fünf Pflanzen je Genotyp für Strahlungsstressapplikationen in Pflanzgefäße verpflanzt. Diese Applikationen erfolgten im Freiland unter einem UV-undurchlässigen und einem UV-durchlässigen Foliendach, sowie unter voller Sonne mit und ohne Bewässerung. Während der Stressapplikation wurde die stomatäre Leitfähigkeit und die Chlorophyll-Fluoreszenz gemessen, Thermalbilder erstellt und die Nekrosenintensität täglich dokumentiert. Innerhalb von sieben Tagen waren an schattiert angezogene Pflanzen, im Gegensatz zu unschattiert angezogenen Pflanzen, deutliche Reaktionen an sonnenexponierten Blättern in Form von Nekrosen zu erkennen. Ein zusätzlicher Einfluss von Trockenstress intensivierte diese Reaktion nicht. Zudem wurde deutlich, dass physiologische Messungen während der Stressapplikation nicht mit dem Auftreten der Nekrosen übereinstimmten. Thermalbilder und die stomatäre Leitfähigkeit wurden stark vom zusätzlichen Trockenstress und der höheren Lufttemperatur unter den Foliendächern beeinflusst. Nur die Chlorophyll-Fluoreszenz zeigte signifikante Unterschiede zwischen den gesunden Blättern unter dem UV-undurchlässigen Foliendach und den geschädigten Blättern im Freiland nach schattierter Anzucht. Jedoch traten auch Unterschiede zwischen *Impatiens*-Sorten nach unschattierter Anzucht auf, an denen keine geschädigten Blätter zu erkennen waren. Somit wiesen diese physiologischen Messungen während der Strahlungsstressapplikation auf kein Potenzial zur Identifizierung von Strahlungsstresstoleranz hin. Hingegen zeigten Blattquerschnitte und physiologische Messungen nach der Anzucht, dass Blätter, die sich unter hohem Strahlungsangebot entwickelt haben, ein dickeres Palisadenparenchym, mehr Chloroplasten und eine höhere Sättigungskurve der Photosyntheserate aufweisen. Letztendlich wird die Strahlungsstresstoleranz von den Anzuchtbedingungen stark beeinflusst, was die Identifikation einer Strahlungsstresstoleranz erschwert.

Schlagwörter:

Impatiens Neuguinea, Strahlungsstress, stomatäre Leitfähigkeit, Thermalbilder, Chlorophyll-Fluoreszenz, Blattquerschnitte

Abstract

The aims of the investigation were to characterize the light stress reaction regarding the morphology, anatomy and physiology of five *Impatiens* varieties. For the trials from 2012 to 2014, plants of each variety were grown in greenhouses at different light conditions. To produce plants with a higher light sensitivity, the light intensity was reduced by using common shading systems (70 % shading). After 10 weeks of pre-treatment at different light conditions, five plants of each variety were transferred into balcony boxes. To determine the anatomical reactions, some leaves were harvested and used for histological investigations. For the light stress treatment, plants were placed outside under UV-impermeable foil, UV-permeable foil and in full sun radiation with and without irrigation. In addition, the stress reaction of plants was evaluated by measuring the stomatal conductance and chlorophyll fluorescence, by using thermal images and by documenting leaf damage daily. Within seven days of light stress the plants subjected to the low light pre-treatment had a significantly higher stress reaction on sun exposed leaves than the plants subjected to the high light pre-treatment. The additional drought stress did not intensify this reaction. Furthermore, the physiological measurements during the stress application were not confirmed by the emergence of leaf damage. The thermal images and the stomatal conductance were influenced strongly by the additional drought stress and by the higher air temperature under the foil. Only the chlorophyll fluorescence showed significant differences between the healthy leaves under UV-impermeable foil and the damaged leaves later under full sun of low light pre-treatment plants. However the chlorophyll fluorescence showed differences between the *Impatiens* varieties after high light pre-treatment although where were not leave reactions. Thus these physiological measurements during the stress application showed no potential to detect radiation stress tolerant plants. But pictures of tissue sections and physiological measurements after pre-treatment illustrated that the leaves developed under high light conditions have more densely packed palisade parenchyma, more chloroplasts and a greater saturation curve of photosynthesis rate compared to the leaves developed in low light conditions. Finally, the results demonstrated that the conditions of plant cultivation strongly influence on light stress adaption what makes the identification of light stress tolerant difficult.

Keywords:

Impatiens New Guinea, radiation stress, stomatal conductance, thermal imaging, chlorophyll fluorescence, leaf cross-section

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURANALYSE.....	2
2.1 Stress - Definitionen	2
2.2 Stressbelastungen für Pflanzen	4
2.3 Stressreaktionen als Antwort auf abiotische Stressoren	5
2.4 Stressreaktionen von Kulturpflanzen	7
2.4.1 Stressreaktionen auf Trockenheit.....	8
2.4.2 Stressreaktionen auf hohe photosynthetisch aktive Strahlung.....	9
2.4.3 Stressreaktionen auf hohe UV-B-Strahlung	10
2.4.4 Stressreaktionen auf multiple Belastung	13
2.4.5 Stressreaktionen am Beispiel von <i>Impatiens Neuguinea</i>	13
2.5 Schutzmechanismen gegenüber Strahlungsstress bei Kulturpflanzen	15
2.5.1 Anpassungsmechanismen an Strahlungsstress.....	15
2.5.2 Reparaturmechanismen von Strahlungsstressreaktionen.....	16
2.6 Methoden zur Identifizierung von Stress bei Kultur- und Zierpflanzen	17
3. KENNTNISLÜCKEN UND ZIELSETZUNG	20
4. ARBEITSHYPOTHESEN UND VERSUCHSFRAGEN.....	21
5. MATERIAL UND METHODEN	22
5.1 Pflanzenmaterial	22
5.2 Pflanzenanzucht	23
5.2.1 Allgemeine Kulturbedingungen.....	23
5.2.2 Variation des Strahlungsangebotes.....	23
5.3 Prüfstand zur Untersuchung von Strahlungsstress.....	25
5.3.1 Freilandprüfstand	26
5.3.1.1 Untersuchungen zur Gestaltung des Freilandprüfstandes	26
5.3.1.2 Wasserversorgung während der Stressapplikation	27
5.3.1.3 Stressapplikation auf einem Freilandprüfstand.....	27
5.3.1.4 Erfassung der Stressbedingungen.....	30
5.3.2 Künstlichprüfstand	30

5.4	Bonituren und Messungen von Pflanzenmerkmalen	31
5.4.1	Erfassung von Merkmalen nach der Anzucht.....	31
5.4.1.1	Pflanzenmorphologische Merkmale.....	32
5.4.1.2	Pflanzenanatomische Merkmale.....	34
5.4.1.3	Pflanzenphysiologische Merkmale.....	37
5.4.1.4	Berechnung der phänotypischen Plastizität.....	40
5.4.2	Erfassung von Pflanzenparametern während der Stressapplikation.....	40
5.4.2.1	Morphologische Stressreaktionen.....	40
5.4.2.2	Physiologische Stressreaktionen	43
5.5	Statistische Auswertung	48
6.	ERGEBNISSE	49
6.1	Prüfstand zur Untersuchung von Strahlungsstressreaktionen	49
6.1.1	Gestaltung eines Freilandprüfstandes	49
6.1.1.1	Witterungsbedingungen während der Stressapplikation	50
6.1.1.2	Kontrolle des Wasserangebotes	51
6.1.2	Ansätze zur Gestaltung eines Kunstlichtprüfstandes	53
6.1.3	Bewertung der Prüfstände	54
6.2	Allgemeine Reaktionen von Impatiens-Genotypen auf Strahlungsstress	55
6.3	Spezifische Reaktionen von Impatiens-Genotypen auf Strahlungsstress	58
6.3.1	Morphologische Reaktionen	58
6.3.2	Anatomische Reaktionen.....	61
6.3.3	Physiologische Reaktionen.....	62
6.3.4	Diskussion und Zusammenfassung.....	69
6.4	Spezifische Reaktionen von Impatiens-Genotypen auf UV-Strahlung	70
6.4.1	Morphologische Reaktionen	70
6.4.2	Physiologische Reaktionen.....	71
6.4.3	Diskussion und Zusammenfassung.....	74
6.5	Einfluss der Anzuchtbedingungen auf Strahlungsstressreaktionen.....	75
6.5.1	Morphologische Reaktionen	75
6.5.2	Anatomische Reaktionen.....	76
6.5.3	Physiologische Reaktionen.....	79
6.5.4	Diskussion und Zusammenfassung.....	83
6.6	Einfluss der Anzuchtbedingungen auf Impatiens-Genotypen	84
6.6.1	Methodischer Hinweis.....	84
6.6.2	Morphologische Pflanzenmerkmale	85
6.6.3	Anatomische Pflanzenmerkmale	92

6.6.4	Physiologische Pflanzenmerkmale.....	94
6.6.5	Diskussion und Zusammenfassung.....	95
6.7	Einfluss anzuchtbedingter Merkmalsausprägungen von Impatiens-Genotypen auf die Intensität von Strahlungsstressreaktionen	96
6.7.1	Morphologische Pflanzenmerkmale vs. Strahlungsstressreaktionen	96
6.7.2	Diskussion und Zusammenfassung.....	100
7.	DISKUSSION.....	102
7.1	Möglichkeiten und Grenzen von Freilandprüfständen zur Untersuchung der Strahlungsstresstoleranz von Impatiens-Genotypen.....	103
7.2	Spezifische Strahlungsstressreaktionen verschiedener Impatiens-Genotypen und ihre Entstehung unter Freilandbedingungen	105
7.3	Differenzierung von Trocken- und Strahlungsstressreaktionen verschiedener Impatiens-Genotypen unter Freilandbedingungen.....	108
7.4	Modifikation von Stressreaktionen verschiedener Impatiens-Genotypen durch Anzuchtbedingungen	110
7.5	Merkmale der Strahlungsstresstoleranz bei Impatiens-Genotypen.....	113
8.	ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNG.....	116
8.1	Möglichkeiten zur Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz von Impatiens durch kulturtechnische Maßnahmen	116
8.2	Möglichkeiten zur Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz von Impatiens durch züchterische Maßnahmen	117
8.3	Schlussfolgerungen für den wissenschaftlichen Neuwert und für weiterführende Arbeiten.....	118
9.	ZUSAMMENFASSUNG.....	119
10.	LITERATURVERZEICHNIS.....	122
ANHANG.....		134
DANKSAGUNG		138
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG		139

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Phasenmodell des Stressgeschehens (LARCHER 2001; SELYE 1973), verändert.....	4
Abb. 2:	Unterschiedliches Strahlungsangebot zum Studium des Anpassungspotentials der Genotypen und des Verhaltes während einer späteren Stressphase im Freiland	24
Abb. 3:	Pflanzenaufbau verschiedener <i>Impatiens</i> -Genotypen im Versuchsjahr 2012 nach einer 10-wöchigen Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot.....	25
Abb. 4:	Testpflanzen SunP 'Magenta' (links) und ImP 'Moorea' (rechts) im 11er Topf nach vier Stunden im Freiland unter hohem Strahlungsangebot ohne Nachwässerung	26
Abb. 5:	Eichgerade zur Bewässerung der Pflanzgefäße während der Stressapplikation	27
Abb. 6:	Regensichere Pflanzgefäße mit 5 Pflanzen in mehrfacher Wiederholung.....	28
Abb. 7:	Spektrale Zusammensetzung der Strahlung auf dem Prüfstand (absolute Intensität)	29
Abb. 8:	Kunstlichtprüfstand mit zwei Halogenstrahlern testweise mit <i>Petunia</i> -Jungpflanzen (links) und mit 5 Wochen alten <i>Impatiens</i> -Genotypen (rechts)	31
Abb. 9:	Schattenbildanalyse zur Ermittlung der Pflanzengröße links vor und rechts nach der Bearbeitung mit der Software WinDIAS 3 Colour Image Analysis System.....	33
Abb. 10:	Entnahme der Blattproben (A), Fixierung in PE-Röhrchen (B), Infiltration in speziellen Einbettkassetten (C) und Einbettung in Parafin (D).....	35
Abb. 11:	Lichtmikroskopische Aufnahme eines Blattquerschnittes von <i>Impatiens</i> der Sorte ImP 'Logia' mit einer W3A Färbung nach WACKER (2006) mit Ochsen-galle versetzt (Maßstab = 50 µm).....	37
Abb. 12:	Messung des Gaswechsels für eine Lichtsättigungskurve von <i>Impatiens</i> mit dem GFS 3000 der Firma WALZ	38
Abb. 13:	Detailansicht weißlich-brauner Aufhellungen an <i>Impatiens</i> Blättern.....	41
Abb. 14:	Bildunterstütztes Boniturschema zur Erfassung von Nekrosen an <i>Impatiens</i>	41

Abb. 15:	Bildunterstütztes Boniturschema zur Erfassung von Welke an <i>Impatiens</i>	42
Abb. 16:	Messung der stomatären Leitfähigkeit von <i>Impatiens</i> mit dem GFS 3000	44
Abb. 17:	Thermalbild (links) und visuelle Aufnahme (rechts) von <i>Impatiens</i> im Pflanzgefäß mit Referenzpflanze.....	46
Abb. 18:	Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz mit der MINI-PAM von WALZ an <i>Impatiens</i>	47
Abb. 19:	Prüfstand zur Applikation von Strahlungsstress am Beispiel der Gattung <i>Impatiens</i>	49
Abb. 20:	Maximale Einstrahlung und mittlere Tagestemperatur an den ersten sechs Versuchstagen während der Stressapplikation im Freiland in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014.....	50
Abb. 21:	Temperaturverlauf im Freiland und unter einem Foliendach in den Versuchsjahren 2012 und 2013.....	51
Abb. 22:	Zusammenhang zwischen dem Systemgewicht und der Saugspannung (links) sowie zwischen einer einseitigen und beidseitigen Wägung der Pflanzgefäße (rechts)	52
Abb. 23:	Systemgewichte der Pflanzgefäße von <i>Impatiens</i> während der Stressapplikation	52
Abb. 24:	Reaktionen der Sorte ImP 'Moorea' unter Kunstlicht (links) und im Freiland (rechts).....	54
Abb. 25:	Blattoberseitige Nekrosen an verschiedenen <i>Impatiens</i> -Sorten	55
Abb. 26:	Reaktionen auf Strahlungsstress der <i>Impatiens</i> -Sorten 'Logia', 'Moorea' und 'Timor'	56
Abb. 27:	Reaktionen auf Strahlungsstress der SunPatiens-Sorten 'Magenta' und 'Orange'	57
Abb. 28:	Welke- und Nekrosenintensität von verschiedenen <i>Impatiens</i> -Sorten nach sieben Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2012.....	58
Abb. 29:	Welke- und Nekrosenintensität von verschiedenen <i>Impatiens</i> -Sorten nach sieben Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2013 und 2014.....	59

Abb. 30:	Querschnitt eines gesunden Blattes der Sorte ImP 'Timor' (Maßstab = 50 µm).....	61
Abb. 31:	Querschnitte von nekrotischen Blättern verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach sieben Tagen Strahlungsstressapplikation im Versuchsjahr 2014 (Maßstab = 50 µm)	62
Abb. 32:	Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Strahlungsstress und Kombi-Stress sechs Tage nach Stressbeginn (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$).....	63
Abb. 33:	Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Kontrolle, Strahlungsstress und Kombi-Stress zwei Tage nach Stressbeginn (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$).....	64
Abb. 34:	Stomatäre Leitfähigkeit der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und Strahlungsstress in den ersten vier Tagen der Stressapplikation (signifikante Unterschiede zwischen den Tagen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 9$)	65
Abb. 35:	CWSI verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Kontrolle und Trockenstress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)	66
Abb. 36:	CWSI verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Kontrolle und Strahlungsstress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$).....	67
Abb. 37:	F_v/F_m -Indizes der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und Strahlungsstress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$).....	68
Abb. 38:	Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Kontrolle und UV-Stress nach fünf Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2013 und 2014	70

Abb. 39:	Reaktionen der Sorte ImP 'Logia' nach fünf Tagen Stressapplikation unter Kontrolle (UV-undurchlässiges Foliendach) und UV-Stress (UV-durchlässiges Foliendach).....	71
Abb. 40:	Stomatäre Leitfähigkeit der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und UV-Stress in den ersten vier Tagen der Stressapplikation (signifikante Unterschiede zwischen den Tagen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 9$).....	72
Abb. 41:	CWSI verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter Kontrolle und UV-Stress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)	73
Abb. 42:	F_v/F_m -Indizes der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und UV-Stress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$).....	74
Abb. 43:	Welke- und Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Genotypen aus unschattierter (links) und schattierter (rechts) Anzucht nach sieben Tagen Stressapplikation unter Kontrolle, Strahlungsstress und Kombi-Stress im Versuchsjahr 2012 und 2014	76
Abb. 44:	Blattquerschnitte verschiedener unschattiert angezogener <i>Impatiens</i> -Sorten nach sieben Tagen Strahlungsstressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2014 (Maßstab = 50 μm).....	77
Abb. 45:	Vergleich der Blattquerschnitte der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach unschattierter und schattierter Anzucht und nach sieben Tagen Strahlungsstress (Maßstab = 50 μm)	78
Abb. 46:	Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach unschattierter und schattierter Anzucht unter sechs Tagen (oben) und zwei Tagen (unten) Strahlungsstress und Kombi-Stress (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$).....	80
Abb. 47:	CWSI verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach unschattierter und schattierter Anzucht unter drei Tagen Kontrolle und Strahlungsstress (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante	

	Unterschiede innerhalb der Sorte sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)81
Abb. 48:	F_v/F_m -Indizes der Sorte ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach unschattierter und schattierter Anzucht unter Kontrolle und Strahlungsstress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$).....82
Abb. 49:	Anzahl der Bewässerungsvorgänge verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten in einer 10-wöchigen Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot in den Versuchsjahren 2012 und 2014 (— Durchschnitt der Bewässerungsvorgänge).....84
Abb. 50:	Pflanzenaufbau der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach einer 10-wöchigen Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot im Versuchsjahr 2012.....85
Abb. 51:	Anzahl Stomata pro Blattfläche der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 10$).....86
Abb. 52:	Schattenbildfläche verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$).....87
Abb. 53:	Kompaktheit verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$)88
Abb. 54:	Blattdicke und Dicke der Gewebeschichten von verschiedenen <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; (ANOVA, $p < 0,05$, $n = 50$)89
Abb. 55:	Spezifische Blattfläche verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 30$).....90

Abb. 56:	Index der phänotypischen Plastizität und der mittleren phänotypischen Plastizität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3-4$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$)	92
Abb. 57:	Blattquerschnitte der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot im Versuchsjahr 2013 (Maßstab = 50 μm)	93
Abb. 58:	Lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot	94
Abb. 59:	Beziehungen zwischen Schattenbildfläche und Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$)	97
Abb. 60:	Beziehungen zwischen Kompaktheit und Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$)	98
Abb. 61:	Beziehungen zwischen spezifischer Blattfläche und Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$)	99
Abb. 62:	Beziehungen zwischen Blattdicke und Nekrosenintensität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze ($n = 2$)	100

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Abiotische und biotische Stressoren (BRUNOLD et al. 1996), verändert	5
Tab. 2:	Pflanzenmaterial für die Charakterisierung von Strahlungsstresstoleranz	23
Tab. 3:	Bedingungen während der Anzucht.....	24
Tab. 4:	Prüfvarianten zur Applikation von Strahlungsstress	28
Tab. 5:	Spektrale Zusammensetzung der Strahlung auf den Prüfstand ($\text{W/m}^2 \pm \text{SD}$)	29
Tab. 6:	Merkmale und Methoden zur Erfassung der Stresstoleranz an <i>Impatiens</i> Neuguinea	32
Tab. 7:	Rezept für 100 ml Fixierungslösung	35
Tab. 8:	Anleitung zur Infiltration der fixierten Blattproben	36
Tab. 9:	Anleitung für die W3A-Färbung von Blattquerschnitten	37
Tab. 10:	Boniturschema zur Erfassung von Nekrosen an <i>Impatiens</i>	42
Tab. 11:	Boniturschema zur Erfassung von Welkeerscheinungen an <i>Impatiens</i>	43
Tab. 12:	Gegenüberstellung von Freiland- und Kunstlichtbedingungen mit Halogenstrahler	53
Tab. 13:	Prüfung der Nekrosenintensität als Median über die <i>Impatiens</i> -Sorten (signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).....	60
Tab. 14:	Verringerung der Blattdicke verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten der schattierten Anzucht zur unschattierten Anzucht in den Versuchsjahren 2012 und 2013	89
Tab. 15:	Index der phänotypischen und der mittleren phänotypischen Plastizität verschiedener <i>Impatiens</i> -Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014.....	91

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
*	Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,05
**	Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,01
***	Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,001
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
µmol/m ² s	Einheit für die Strahlungsintensität
A	Assimilationsrate
ABA	Abscisinsäure
ANOVA	Einfaktorielle Varianzanalyse
BN	Bonitur-Note
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DNS	Desoxyribonukleinsäure
E	Transpirationsrate
F _v /F _m	maximale Quantenausbeute des PSII
g	Gramm
GPX	Glutathion-Peroxidase
GR	Glutathion-Reductase
GWH	Gewächshaus
h	Stunde
H ₂ O	Dihydrogenmonoxid (Wasser)
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
Imp	<i>Impatiens</i>
klx	Kilolux
l	Liter
MANOVA	Mehrfaktorielle Varianzanalyse

mbar	Millibar
ml	Milliliter
MPa	Megapascal
MPP	Mittlere phänotypische Plastizität
n	Stichprobenumfang
NDVI	Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex
nm	Nanometer
NPQ	Energieabgabe durch Wärme
ns	nicht signifikant
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
PAR	photosynthetic active radiation (photosynthetisch aktive Strahlung)
PFD	Photonenflussdichte
PPI	Index der phänotypischen Plastizität
PR	Peroxiredoxin
PSI	Photosystem I
PSII	Photosystem II
qN	Energieabgabe durch Fluoreszenz
qP	chemisch genutzte Energie
R	Spearman Rangkorrelationskoeffizient
ROS	reaktive oxygen species (Reaktive Sauerstoffspezies)
SD	Standardabweichung
sek	Sekunde
SLA	specific leaf area (Spezifische Blattfläche)
SOD	Superoxiddismutase
SunP	SunPatiens
UV-A	Ultraviolett A (380 - 315 nm)
UV-B	Ultraviolett B (315 - 280 nm)
UV-C	Ultraviolett C (280 - 100 nm)

1. Einleitung

Impatiens Cultivars der Neuguinea Gruppe, im folgenden *Impatiens* Neuguinea, wurden 1983 in den deutschen Markt eingeführt (HORN 1996) und gehören laut AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft) (2012) zu den beliebtesten 10 der Beet- und Balkonpflanzen. Nach der Produktion im geschützten Gewächshaus und einer Transport- und Vermarktungsphase werden *Impatiens* Neuguinea mit anderen Gattungen und Arten in öffentlichen Parks, auf Friedhöfen, in Beete oder in Balkonkästen verpflanzt. *Impatiens* haben ein sehr ansehnliches und beachtliches Erscheinungsbild, das durch eine strahlungsreiche und niederschlagsarme Phase ohne ausreichende Pflege beeinträchtigt werden kann. Grund dafür ist, dass *Impatiens* Neuguinea ab einer Lichtintensität von 64 klx mit Sonnenbrand auf den Blättern reagiert (BAILEY 1999). Daher wird schon in der Anzucht ab April eine Schattierung empfohlen (RÖBER & WOHANKA 2014). Durch diese schattierte Anzucht werden *Impatiens* Neuguinea empfindlicher gegenüber hoher Strahlungsintensität, auf die sie mit Blatt- und Blütenverbrennungen reagieren. Diese Reaktionen beeinflussen das Erscheinungsbild von *Impatiens* Neuguinea negativ.

Aber nicht nur extreme Witterungsbedingungen lösen bei Pflanzen Stress aus, sondern auch die Globalisierung der Märkte. Vermarktungswege werden länger und eine Verschiebung der Vermarktung zu branchenfremdem Handel ohne Fachwissen und ausreichender Beratung für den Kunden führen zu einer Naturentwöhnung der Konsumenten. Fehlendes Fachwissen führt dazu, dass Pflanzen sowohl im branchenfremden Handel als auch beim Kunden unter nicht optimalen Bedingungen ausgestellt und ausgepflanzt werden. Dies sind Gründe dafür, dass die Stresstoleranz inzwischen auch bei Freilandzierpflanzen zu den prioritären Züchtungszielen zählt.

Im Rahmen des Projektes „Stressphysiologie von Beet- und Balkonpflanzen“ wurde an der Hochschule Geisenheim University die Trocken- und Strahlungsstresstoleranz von *Petunia*- und *Impatiens*-Genotypen getestet. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Charakterisierung von Strahlungsstressreaktionen am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen unter Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale. Für diese Charakterisierung wurde ein Prüfstand zur Untersuchung und Boniturmuster zur Charakterisierung von Trocken- und Strahlungsstressreaktionen entwickelt. Auf diesem Prüfstand findet eine Identifizierung der Strahlungsstresstoleranz unter der Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale statt. Hauptaugenmerk liegt auf der Beschreibung von Strahlungsstressreaktionen und auf der Identifizierung von Toleranzmerkmalen für Strahlungsstress, mit denen ein zuverlässiges Screeningkonzept zur frühzeitigen Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz entwickelt werden kann.

2. Literaturanalyse

2.1 Stress - Definitionen

Zur Bearbeitung des Themas „Beiträge zur Charakterisierung der Strahlungstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen unter der Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale“, werden häufig die Begriffe Stress, Anpassung und Toleranz verwendet. Diese Begriffe sind zwar im Allgemeinen bekannt, wegen eines unterschiedlichen Verständnisses sollen die Begriffe vorab, insbesondere im Hinblick auf pflanzenbauliche Untersuchungen, definiert werden. Zudem wird zum besseren Verständnis des Ablaufes einer Stresssituation, das Phasenmodell des Stressgeschehens nach SELYE (1973) beschrieben.

Stress

Nach LARCHER (2001) und HEß (2008) wird der Begriff „Stress“ verwendet, um einen Zustand zu beschreiben, der außergewöhnlich und auffallend vom Lebensoptimum abweicht und somit eine Belastung ist, die im Weiteren zu einer Schädigung führen kann. Eine Pflanze wird demnach als gestresst bezeichnet, wenn Umwelt- oder Umfeldbedingungen zu einer Belastungssituation führen, die Wachstum und Entwicklung der Pflanze beeinträchtigen (BRUNOLD et al. 1996). Nach BRUNOLD et al. (1996) und LARCHER (2001) entstehen solche Belastungssituationen, wenn Pflanzen um die Ressourcen Wasser und Nährstoff konkurrieren oder wenn sie von Pilzen, Bakterien oder Viren befallen werden. Stress kann außerdem durch Wind, Temperatur oder Sonneneinstrahlung entstehen. Diese stressauslösenden Faktoren werden als Stressoren bezeichnet.

Anpassung

Die Lebensstrategie von Pflanzen ist laut LARCHER (2001) ein Kompromiss aus Ertragsbildung und Überlebenssicherheit. Um dies zu erfüllen, passen sich Pflanzen an die aktuellen Umweltbedingungen an. Diese Anpassung kann modulativ (reversibel), modifikativ (irreversibel) oder evolutiv (genetisch) erfolgen (LARCHER 2001). Bekannte Anpassungsformen an hohe Einstrahlung sind die Verlagerung von Chlorophyll an die Zellwände (TAKAHASHI & BADGER 2011) oder die Entwicklung von Sonnenblättern mit einer höheren Photosyntheseleistung (BRUNOLD et al. 1996; WEILER & NOVER 2008). Die Fähigkeit sich an Stressbelastungen anzupassen, wird durch die Genetik der jeweiligen Pflanze

begrenzt. Demnach kommt es laut BRUNOLD et al. (1996) zur Schädigung der Pflanze bis hin zum Aussterben der Pflanzenart, wenn die genetischen Voraussetzungen nicht gegeben sind oder überschritten werden.

Resistenz, Toleranz und Vermeidung

Nach HALLMANN et al. (2007) wird bei Pflanzen von einer Resistenz nur im Zusammenhang mit biotischen Stressoren, wie einem Pathogenbefall, gesprochen. Grund dafür ist, dass der biotische Stressor durch den Befall einer Pflanze negativ beeinflusst wird, in dem der Stressor sich nicht mehr fortpflanzen kann oder stirbt. Bei abiotischen Stressoren, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, wird der Begriff Toleranz verwendet. Hierbei kann der Stressor nicht negativ beeinflusst werden, weshalb die Toleranz an der Entwicklung der Pflanze und nicht an der Entwicklung des Stressors gemessen wird (HALLMANN et al. 2007). Bei der Stressvermeidung entzieht sich die Pflanze abiotischen und biotischen Stressoren aktiv unter anderem durch die Ausbildung von Überdauerungsorganen oder von zweckdienlichen morphologischen Eigenschaften, wie Dornen oder einer dickeren Borke (BRUNOLD et al. 1996).

Phasenmodell des Stressgeschehens

Die Definitionen zeigen, dass Stress, Anpassung und Toleranz eng beieinander liegende Prozesse sind. Das nach dem kanadischen Mediziner SELYE (1973) formulierte und nach LARCHER (1987) auf die Ökophysiologie der Pflanze weiterentwickelte Phasenmodell des Stressgeschehens verdeutlicht die Prozesse in einer Pflanze (Abb. 1). An der ersten Stelle des Stressgeschehens steht die Alarmphase. Phytohormone oder sekundäre Botenstoffe signalisieren in dieser Phase Änderungen im Umfeld und die natürliche Resistenz/Toleranz nimmt ab. Erste reversible Stressreaktionen werden sichtbar. Im Falle von Wassermangel ist zu diesem Zeitpunkt eine Erhöhung der Abscisinsäure- (ABA-) Synthese zu erkennen und erste Welkeerscheinungen werden sichtbar (BRUNOLD et al. 1996). In der nachfolgenden Restitutionsphase greifen Reparaturmechanismen ein und stellen die natürliche Resistenz/Toleranz wieder her. Dies ist die Phase der Anpassung und spiegelt sich bei erhöhter Einstrahlung in der Ausbildung von Sonnenblättern wider. Wenn die Belastungssituation abnimmt, kommt es im Anschluss zu einer Enthärtungsphase. Nimmt die Belastungssituation nicht ab oder tritt eine Überforderung der Reparaturmechanismen ein, wird die Pflanze in ihrer Entwicklung und in ihrem Wachstum beeinträchtigt. Die Folgen sind irreversible Schädigungen, wie die Ausbildung von Nekrosen oder Blattabwurf, die sogar so weit gehen können, dass an dieser Stelle eine ganze Pflanzenart ausstirbt (LARCHER 1987).

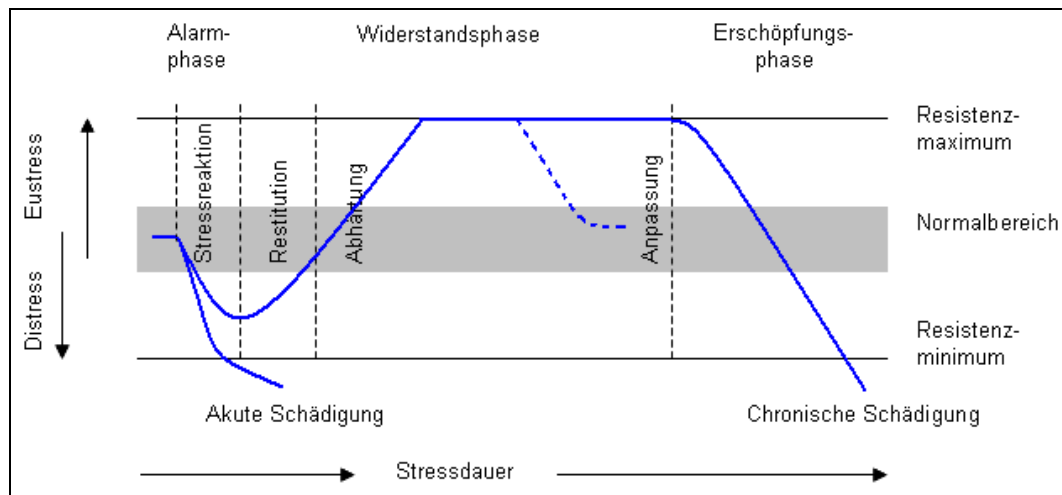


Abb. 1: Phasenmodell des Stressgeschehens (LARCHER 2001; SELYE 1973), verändert

2.2 Stressbelastungen für Pflanzen

Wie eingangs erwähnt, werden Stressbelastungen und Belastungssituationen durch Witterungsbedingungen und Pathogene als Stressoren bezeichnet und in abiotische und biotische Stressoren untergliedert. Abiotische Stressoren lassen sich zudem noch in physikalische und chemische Stressoren aufteilen (BRUNOLD et al. 1996; LARCHER 2001; TESCHE 1995). Tab. 1 zeigt eine Übersicht über abiotische und biotische Stressoren, die bei Pflanzen zu Stressbelastungen führen können. In der freien Natur, aber auch im geschützten Anbau, werden Stressbelastungen meist nicht von einem Stressor allein ausgelöst. Häufig tritt eine Kombination aus mehreren Stressoren auf, die sich in einem Stressorenbündel vereinen und multiple oder komplexe Stressreaktionen hervorrufen können (SCHULZE et al. 2005). Vielfach auftretende Kombinationen sind Staunässe mit Sauerstoffmangel, Nährstoffüberschuss und Versalzung oder hohe Temperaturen mit UV-Strahlung und Wassermangel. Zudem führt ein zu enger Stand zu einer Konkurrenz in der Pflanzengemeinschaft, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit eines Befalls durch Insekten und Pilze erhöht (BRUNOLD et al. 1996; TESTER & BACIC 2005). Aber auch eine Trockenstresssituation, auf die die Pflanze mit dem Schließen der Stomata reagiert, führt zu einer Reduzierung der CO_2 -Aufnahme und im weiteren Sinne zu oxidativem Stress. Diese Kettenreaktion wird von SCHULZ et al. (2005) als multipler Stress bezeichnet. Wie aus der Tab. 1 ebenfalls zu erkennen ist, wird im Bereich der physikalischen Stressoren zwischen Lichtüberschuss und UV-Strahlung differenziert. Die vorliegende Arbeit berücksichtigt jedoch beide Stressoren als direkte Sonneneinstrahlung bzw. ist damit die gesamte Globalstrahlung gemeint. Im Folgenden wird dafür der Begriff Strahlungstress als Stressor verwendet.

Tab. 1: Abiotische und biotische Stressoren (BRUNOLD et al. 1996), verändert

Abiotische Stressoren		Biotische Stressoren
Physikalische Stressoren	Chemische Stressoren	
Lichtmangel	Wassermangel und Trockenheit	Konkurrenz in Pflanzengemeinschaft Verbiss Tritt und Mahd Insektenbefall Pilz-, Bakterien- und Virusbefall
Lichtüberschuss	Überflutung, Eisüberzug	
UV-Strahlung	und Sauerstoffmangel	
Ionisierende Strahlung	Nährstoffmangel	
Elektrische und magnetische Felder	Nährstoffüberschuss	
Hohe Temperaturen	Hohe Salzkonzentrationen	
Feuer	Niedrigere und hohe Protonenkonzentrationen	
Niedrigere Temperaturen	Niedrigere und hohe Kalziumkonzentrationen	
Wind	Schwermetalle	
Bodenbewegung	Gasförmige Luftschadstoffe	
Verschüttung		

2.3 Stressreaktionen als Antwort auf abiotische Stressoren

Pflanzen reagieren auf Stressbelastungen mit einer Stressantwort/Stressreaktion. Diese Stressreaktionen können sich morphologisch, physiologisch oder biochemisch äußern (BRUNOLD et al. 1996). Nach LARCHER (2001) führt eine Überschreitung der von Pflanze zu Pflanze unterschiedlichen Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Stressbelastung zu einer elastischen, reversiblen Schädigung. Je nach Dauer und Intensität der Beeinträchtigung geht diese Schädigung in eine plastische, irreversible Schädigung über. Wenn eine Stressreaktion in einen Normalzustand übergeht, verlangt dies einen zusätzlichen Aufwand an Energie und Metaboliten, jedoch wird die Abwehrkraft dieser Pflanze gefördert. Bedingung dafür ist jedoch, dass das Protoplasma durch den Stressor nicht geschädigt wird, da dies zweifelsohne zum Zelltod führt (LARCHER 2001).

Häufige Stressreaktionen, die an Pflanzen als Antwort auf abiotische Stressoren beobachtet werden, sind unter anderem Welke, Nekrose, physiologische Blattflecken, Chlorose und Rotfärbung der Blätter. Sie können den Zierwert von Pflanzen erheblich mindern. Um Beiträge für die Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz zu liefern, ist eine genaue Definition dieser Begriffe notwendig, um die auf dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Prüfstand beobachteten Reaktionen zu vergleichen und einzuordnen.

Welke

Eine Welke äußert sich in einem Erschlaffen und Herabhängen von Pflanzenteilen (HALLMANN et al. 2007). Dabei ziehen sich die Zellen cytorrhytisch zusammen (BEYEL 2003; LARCHER 2001). Dies ist auch bekannt als Turgorverlust. Hervorgerufen wird dieser neben abiotischen Faktoren auch durch Bakterien, Pilze und Nematoden oder durch Milben und Insekten (HALLMANN et al. 2007). Zu den besonders häufig auftretenden Welke auslösenden abiotischen Faktoren zählen Trockenheit, hohe Salzkonzentrationen im Boden oder hohe und niedrige Temperaturen. Diese Faktoren reduzieren den Wassertransport in der Pflanze und können somit anatomisch-morphologische Reaktionen, wie Welke, auslösen (BRUNOLD et al. 1996).

Nekrose

Als Nekrose wird ein abgestorbener Gewebebereich definiert, der scharf abgegrenzt und hell- bis dunkelbraun verfärbt ist (SCHUBERT 2006). HALLMANN et al. (2007) definieren Nekrose als einen lokalen Zell- und Gewebetod, der als Folge der Abtötung des Protoplasmas durch toxische oder physikalische Einwirkungen entsteht. Nekrosen können auch durch Viren, Phytoplasmen, Bakterien, Pilze, Nematoden, Milben und Insekten oder durch abiotische Stressoren entstehen (HALLMANN et al. 2007). Auch Nährstoffmangel und Behandlungen mit Pflanzenschutzmitteln können Nekrosen hervorrufen (SCHUBERT 2006). In Bezug auf den Stressor Strahlungsstress entstehen Nekrosen aus einem Elektronenüberschuss in den Chloroplasten, der zur Bildung von toxischen Sauerstoffradikalen führt. Diese führen wiederum zu Membranläsionen und nachfolgend zu einem Zellzusammenbruch (HALLMANN et al. 2007). Es handelt sich somit um eine irreversible Schädigung der Pflanzen durch toxische Verbindungen.

Physiologische Blattflecken

Physiologische Blattflecken sind im eigentlichen Sinne Nekrosen und es handelt sich hierbei um nicht parasitäre Blattverbräunungen, die bislang nur bei Gerste und Weizen beschrieben wurden (HALLMANN et al. 2007). Sie äußern sich als punktförmige Blattflecken mit oder ohne chlorotischem Hof (GRIMME 2006). ZAHN (2005) und GRIMME (2006) vermuten, dass der Stressor Strahlung in hohen Intensitäten bei der Entstehung von physiologischen Blattflecken eine große Rolle spielt, da bislang nur an strahlungsexponierten Blättern diese physiologischen Blattflecken beobachtet wurden. Ein ähnliches Schadbild, das an gärtnerischen Kulturpflanzen beobachtet wurde, wird auf Mangantoxizität zurückgeführt (HORST & MARSCHNER 1978).

Chlorosen

Chlorosen sind, anders als Nekrosen, hellgrüne bis gelblich weiße Aufhellungen an Blättern oder an der ganzen Pflanze. Nach HALLMANN et al. (2007) sind Chlorosen ein Indiz für einen reduzierten Chlorophyllgehalt, der entweder durch Beeinträchtigung der Synthese oder durch einen Abbau von bereits synthetisiertem Chlorophyll entsteht. Chlorosen können in Folge von Nährstoffmangel entstehen (SCHUBERT 2006), aber auch Viren, Phytoplasmen, Pilze und abiotische Stressoren können Ursachen von Chlorosen sein (HALLMANN et al. 2007). Eine große Rolle bei der Bildung von Chlorosen spielen Stressoren, auf die eine Pflanze mit einer Verengung der Stomata reagiert. Dabei kommt es zu einem geminderten CO₂- und H₂O-Austausch, der wiederum zu einem geminderten Calvinzyklus bei laufender Lichtreaktion führt (GEBAUER 2003).

Rotfärbung

Eine Rotfärbung der Blätter und Blattstiele ist eine Reaktion, die dem Schutz der Pflanzen bei lang andauerndem Stress dient und durch einer erhöhte Anthocyanbildung hervorgerufen wird (NEILL 2002). Anthocyane gehören zur Stoffklasse der Flavonoide und sind somit sekundäre Botenstoffe (WEILER & NOVER 2008). Die Anregung der Synthese erfolgt im Wesentlichen durch Photoinduktion (INDORF 2001), aber auch durch Stress in Folge von Viren und Phytoplasmen oder durch abiotische Stressoren (HALLMANN et al. 2007). Nach ihrer Synthese werden Anthocyane in den Vakuolen der Epidermiszellen verlagert. Dort sind sie in der Lage, tiefere Gewebeschichten vor einer Schädigung durch Sauerstoffradiale zu schützen (JANSEN et al. 1998; NEILL 2002), da Anthocyane zum einen antioxidative Eigenschaften besitzen (SCHÄFER & SCHMID 1993) und zum anderen Strahlung im UV- und PAR-Bereich absorbieren können (JANSEN et al. 1998; WEILER & NOVER 2008).

2.4 Stressreaktionen von Kulturpflanzen

Die allgemeine Definition von Stressreaktionen ist für die Identifizierung und Quantifizierung von Symptomen notwendig. Für die Interpretation der Stressursachen durch spezifische abiotische Stressoren an Kulturpflanzen hingegen, ist die genaue Untersuchung des Entstehungsverlaufes der Stressreaktion erforderlich. Das folgende Kapitel befasst sich daher mit einer systematischen Beschreibung der Stressreaktionen durch Trockenheit, hohe PAR und UV-B-Strahlung sowie durch multiple Stressoren. Zudem wird auf Stressreaktionen eingegangen, die bereits an *Impatiens* Neuguinea beobachtet wurden.

2.4.1 Stressreaktionen auf Trockenheit

Wasser ist für die Pflanze ein Wachstumsfaktor von essentieller Bedeutung. Eine unzureichende Versorgung führt zu einer Belastungssituation, die als Dürrestress (LARCHER 1994) oder als Trockenstress (TAHIRO 2002) bezeichnet wird. Wassermangel kann die Folge von Bodentrockenheit, hoher Verdunstung, osmotischer Wasserbindung in Salz belasteten Böden, Bodenfrost oder flachgründigen Standorten sein (LARCHER 2001). Nach CHAVES et al. (2003) wurden bereits hunderte von Genen, die eine wichtige Rolle in an Wassermangel leidenden Pflanzen einnehmen, identifiziert. Die Reaktion der Pflanzen unter dieser Belastung ist jedoch sehr komplex, da die Funktionen viele dieser Gene noch nicht bekannt sind (CHAVES et al. 2003). Bekannt ist jedoch, dass eine Belastung durch Wassermangel auf Grund der Absenkung des Wasserpotentials in den meisten Fällen nicht akut auftritt, sondern ein Prozess ist, der sich langsam einstellt und sich mit fortlaufender Zeit verstärkt. Die zeitliche Dimension ist daher für das Überleben von Pflanzen unter Trockenstress ein wichtiger Faktor (BRUNOLD et al. 1996).

Das Reaktionsverhalten von Pflanzen auf Trockenstress kann sowohl von anatomisch-morphologischer, als auch von physiologisch-biochemischer Art sein. Je nach Intensität hat Wassermangel daher stets eine wachstumshemmende und destruktive Wirkung (BRUNOLD et al. 1996). CHAVES et al. (2003) teilten daher die Stressreaktionen von Pflanzen in „Long-term Responses“ und „Short-term Responses“ ein. Auch HSIAO (1973) verfuhr danach und erläuterte, dass eine Absenkung des Wasserpotentials um weniger als 0,1 MPa zu einem Rückgang des Turgors führt und damit das Streckungswachstum und die Zellwandbildung hemmt. Trockenstress kann daher bei mäßigem Einsatz zur Wachstumsregulation in der Pflanzenproduktion eingesetzt werden (HANSEN et al. 2005). In der Produktion von Zierpflanzen wird dieser Effekt inzwischen systematisch eingesetzt (BETTIN 2011).

Bei einem leichten bis mäßigen Wassermangel wird eine Akkumulation und Freisetzung des Phytohormons Abscisinsäure (ABA) beobachtet. Dieses Hormon wird in den Wurzelzellen synthetisiert und in die oberirdischen Pflanzenzellen verlagert. Dort steuert ABA physiologische und biochemische Reaktionen. Darunter das Schließen der Stomata, wodurch die Transpiration gemindert und dadurch der Wasserverlust reduziert wird. (LARCHER 2001). Sekundär wird auf diese Weise die CO₂-Aufnahme und die Photosyntheserate reduziert (WEILER & NOVER 2008). Zudem steigt die Blatttemperatur an, da durch das Schließen der Stomata die natürliche Kühlung reduziert wird (JACKSON et al. 1988; MERLOT et al. 2002).

Langanhaltender und massiver Wassermangel bei einem Wasserpotential um 1,0 MPa beeinflusst die Photosynthese, die Atmung und die Prolin- und Zuckeranreicherung

(BRUNOLD et al. 1996). Zudem treten durch cytorrhytisches Zusammenziehen der Zellen Welkeerscheinungen auf, und es kommt zur Seneszenz, da katabole Prozesse beschleunigt werden. Weiterhin entstehen durch Fragmentierung der Zentralvakuole kleinere Teilvakuolen. Auch werden die Plasmamembranen der Chloroplasten und Mitochondrien abgebaut und es kommt schließlich zum Zelltod (BEYEL 2003; LARCHER 2001). An Pelargonien wurde durch massiven Trockenstress neben diesen genannten Welkeerscheinungen auch ein Blattabwurf beobachtet (HASSANEIN & DORIOIN 2006). Diese Reaktion ist auch aus der natürlichen Vegetation bekannt, wenn nach trockenen und warmen Sommermonaten ein früher Laubfall folgt (STEYRER 2007).

2.4.2 Stressreaktionen auf hohe photosynthetisch aktive Strahlung

Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) wird im Spektrum von 380 nm bis 710 nm gemessen. Dieser Bereich hat auf Pflanzen eine photosynthetische, photomorphogenetische und thermische Wirkung (ROSS 1981). Nach ROSS (1981) wird die photodestruktive Wirkung von PAR zwar als gering eingeschätzt, die Strahlungswirkung hängt jedoch von Zeitpunkt, Belichtungsdauer, Einfallswinkel und spektraler Zusammensetzung der Strahlung ab (LARCHER 2001). Des Weiteren wurde laut BRUNOLD et al. (1996) an Sonnenpflanzen eine Photoinhibition der lichtgesättigten Photosyntheserate beobachtet, die mit dem Tod der Pflanze enden kann, wenn genetisch bedingte Sonnenpflanzen bei einer niedrigen Photonenflussdichte (PFD) kultiviert werden und plötzlich einer höheren PFD ausgesetzt werden. Bei einer langsam steigenden PFD sind sie jedoch in der Lage, ihre Photosynthese so zu steigern, dass sie die größere Menge an Strahlungsenergie nutzen können (BRUNOLD et al. 1996). Ähnliche Reaktionen konnten auch an der Schattenpflanze *Solanum dulcamara* beobachtet werden. Da diese Pflanze genotypisch an Bedingungen mit einer geringen PFD angepasst ist, war sie nicht in der Lage, sich kurzfristig an Situationen mit einer höheren PFD anzupassen und zu wachsen. Nach einem plötzlichen Transfer zu Bedingungen mit einer hohen PFD konnten schon nach wenigen Minuten photooxidative Pigmentzerstörungen an exponierten Blattstellen beobachtet werden (POWLES 1984). Auch an Blättern von *Hedera helix*, die bis zum Herbst von dem Laub der Bäume geschützt waren, konnten Photoinhibitionerscheinungen beobachtet werden, nachdem der Laubabfall der Bäume begonnen hatte und die Pflanzen plötzlich einem hohen Strahlungsangebot ausgesetzt waren (OBERHUBER & BAUER 1991).

Die durch ein hohes Strahlungsangebot beobachtete Photoinhibition ist ein Symptom dafür, dass der Photosyntheseapparat beschädigt wurde. Dieses Symptom ist auf eine hohe Konzentration an reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) zurückzuführen. ROS sind im

pflanzlichen Organismus jedoch keine Seltenheit, da sie ein unvermeidbares Nebenprodukt des anaeroben Stoffwechsels sind. Im Idealfall herrscht jedoch ein Gleichgewicht zwischen Bildung und Entgiftung der ROS. Systeme, die zur Bildung von ROS beitragen, sind unter anderem die Photosynthese und die Atmungskette (ARORA et al. 2002; GRIMME 2006; ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004). Das Zentrum für die Entstehung von ROS liegt somit in den Chloroplasten (GRIMME 2006) und der Ausgangspunkt für eine hohe Produktion von ROS ist überschüssige Strahlungsenergie (WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013), da verschiedene Absorptionsspektren der Antennenpigmente mehr Strahlungsenergie aufnehmen können, als sie umsetzen können (ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004).

Die so entstandenen ROS sind sehr reaktiv und wirken zytotoxisch, wodurch sie in der Lage sind, ungesättigte Fettsäuren zu schädigen. Durch Peroxidation von Membranlipiden im Plasmalemma kommt es zur Destabilisierung der Zellmembran, was zur Austrocknung der Zelle bis hin zum Zelltod führt (CHOI et al. 2007; WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013). Es können auch die intrazellulären Membranen, wie die der Mitochondrien und Chloroplasten, geschädigt werden. In diesem Fall werden die Atmungsaktivität und die CO₂-Fixierung beeinträchtigt. Des Weiteren kann durch eine hohe Konzentration von ROS das PSII beschädigt werden, was die Photosynthese beeinträchtigt und zu der beschriebenen Photoinhibition führt. ROS führen somit zu einer Oxidation von Pigmenten, was anhand von chlorotischen Blättern zu erkennen ist (ARORA et al. 2002; GRIMME 2006; MITTLER 2002; ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004) und auch als programmierter Zelltod beschrieben wird (WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013).

2.4.3 Stressreaktionen auf hohe UV-B-Strahlung

UV-Strahlung hat die höchste photodestruktive Wirkung auf Pflanzen (ROSS 1981). Sie ist zwar nur mit 9 % an der Gesamtstrahlung beteiligt (INDORF 2001), jedoch geht von ihr ein so hoher Energiegehalt aus, dass sie eine ausgeprägte zerstörerische Kraft aufweist (BRUNOLD et al. 1996). UV-Strahlung wird in drei Wellenlängenbereichen unterteilt. UV-A-Strahlung liegt zwischen 320 nm bis 380 nm, UV-B-Strahlung liegt zwischen 280 nm und 320 nm und UV-C-Strahlung rundet das UV-Spektrum von 100 nm bis 280 nm ab (BRUNOLD et al. 1996; JANSEN et al. 1998; LARCHER 2001; ROSS 1981). Die UV-C-Strahlung besitzt die höchste Intensität. Es geht von ihr für alle Lebewesen die größte Gefahr aus, da sie in der Lage ist, Proteine und DNS-Stränge zu denaturieren (STAPLETON 1992). UV-C-Strahlung wird daher auch zum Abtöten von Bakterien in Sterilisationsapparaturen eingesetzt (BRUNOLD et al. 1996). Unter natürlichen Bedingungen stellt die UV-C-Strahlung jedoch kein Problem dar, da sie vollständig von der stratosphärischen Ozonschicht absorbiert wird und somit nicht auf die

Erdoberfläche trifft (WITUSZYŃSKA & KAPIŃSKI 2013). Anders ist es bei der UV-B- und UV-A-Strahlung. Nur die UV-B-Strahlung unterhalb von 295 nm wird von der Ozonschicht abgefangen. Somit erreichen die über 295 nm liegende UV-B- und die vollständige UV-A-Strahlung die Erdoberfläche (BRUNOLD et al. 1996; JANSEN et al. 1998; YANG & YAO 2008). Wegen ihrer UV-absorbierenden Wirkung ist die Ozonschicht für die Qualität und Quantität der Strahlung verantwortlich. Da der Gehalt an Ozon in der Stratosphäre jedoch seit den letzten Jahren rückläufig ist, erhöht sich der Anteil an UV-B-Strahlung an der Globalstrahlung. Für Deutschland liegt eine Faustregel vor, die besagt, dass eine Abnahme der Ozonschicht von 1 % zu einer Erhöhung der UV-B-Strahlung von 1,5 % führt (LFU 2009). Hoffnung gibt jedoch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die in Zusammenarbeit mit der World Meteorological Organization (WMO) in 2014 einen Bericht veröffentlichten, in dem sie die Schließung des Ozonlochs berichteten. Demnach soll die Ozonschicht Mitte des 21. Jahrhunderts wieder die Dicke haben, wie zu Beginn der 1980er Jahre. Es wird jedoch auch ein stetiger Wandel der Ozonschicht vorausgesagt. Dabei beeinflusst Distickstoffmonoxid (N_2O) zusammen mit vertikalen Luftströmen durch den Klimawandel die Ozonverteilung, wodurch sich die Ozonschicht in den Tropen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wieder reduzieren soll (DLR 2014). Somit bleibt UV-B-Strahlung ein wichtiger Faktor für das Leben und Überleben von Pflanzen, Tieren und Menschen.

Die Reaktion von Pflanzen auf die zusätzliche Belastungssituation durch UV-B-Strahlung ist nach TEVINI und TERAMURA (1989) je nach Art unterschiedlich, da die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung weitgehend genetisch fixiert sein soll. Allgemein bekannt ist die Wirkung von UV-B-Strahlung auf Nukleinsäuren (ROZEMA et al. 1997). UV-B-Strahlung kann auf Grund ihres hohen Energiegehaltes molekulare Schäden hervorrufen, indem sie die Nukleinsäure als Träger der Erbinformation in einen angeregten Zustand versetzt (BRITT 1996). Dabei absorbieren die Nucleotide Purin und Pyrimidin UV-B-Strahlung, es kommt zur Sprengung der Disulfidbrücken und zur Bildung von Einzel- oder Doppelstrangbrüchen. Diese Sprengung kann eine Dimerisierung benachbarter Thyminbasen zur Folge haben (BRITT 1996; BRUNOLD et al. 1996; JANSEN et al. 1998; STAPLETON 1992). Die Replikation und die Genexpression des DNS-Stranges können dadurch nicht korrekt ablaufen. Dies spiegelt sich in einer geminderten Proteinkonzentration wider (BRITT 1996; BRUNOLD et al. 1996; JANSEN et al. 1998; LARCHER 2001). Aber nicht nur benachbarte Thymine, sondern auch Thymine in unmittelbarer Umgebung oder auf beiden Strängen der DNS-Doppelhelix können über einen Cyclobutanring eine kovalente Bindung eingehen (BRUNOLD et al. 1996).

Ein weiterer Wirkungsort der UV-B-Strahlung liegt in den Chloroplasten. Dort wird die Photosynthese durch die Hemmung des Elektronentransports, der Photophosphorylierung und der CO_2 -Fixierung stark beeinträchtigt (JANSSEN et al. 1998). Dabei reagiert das PSII

wesentlich empfindlicher auf UV-B-Strahlung als das PSI. Unter hohen Strahlungsintensitäten kommt es zur Modifikation des D1-Proteins, eines der beiden Reaktionszentren im PSII. Die Modifikation ist zunächst reversibel und kann irreversibel werden, da zur Rückbildung eine geringere Strahlungsintensität benötigt wird (BRUNOLD et al. 1996; SCHÄFER & SCHMID 1993). Auch der Funktionsverlust von Enzymen, durch eine gehemmte Transkription der entsprechenden Gene, kann zur Beeinträchtigung der Photosynthese führen. So kann das Enzym Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase, das von essentieller Bedeutung im Calvinzyklus ist, durch Funktionsverlust die CO₂-Assimilation reduzieren (BRUNOLD et al. 1996; JANSEN et al. 1998).

Die zuvor beschriebenen Mechanismen spiegeln sich in einem reduzierten Pflanzenwachstum wider. Dies wird begleitet von einem ebenfalls reduzierten Blattflächenwachstum (STAPLETON 1992). Untersuchungen von BASIOUNY et al. (1978) mit Sämlingen von C₃- und C₄-Pflanzen haben gezeigt, dass sich die Wachstumsreduktion beider Typen nicht signifikant voneinander unterscheidet. Auf Grund des reduzierten Pflanzenwachstums wurde eine Reduktion des Frisch- und Trockengewichtes festgestellt. Zudem waren die Blätter kleiner und dicker, wiesen eine ledrige Struktur mit Chlorosen und eine dickere Cuticula auf. Eine weitere Untersuchung mit Sojabohnen bestätigte die Aussage, dass Pflanzen auf UV-B-Strahlung mit einem reduzierten Frisch- und Trockengewicht reagierten und in der Folge eine reduzierte Pflanzenhöhe und ein geringeres Blattflächenwachstum aufwiesen (VU et al. 1981). Dies kann bei Nutzpflanzen, wie Weizen und Hafer, zu erheblichen Ertragseinbußen führen, da bei ihnen durch eine erhöhte UV-B-Strahlung die Länge der Sprosse und Blattspreiten beeinträchtigt wird (BRUNOLD et al. 1996).

Das durch UV-B-Strahlung geminderte Pflanzenwachstum kann in einigen Bereichen aber auch positiv genutzt werden. In der Gemüseproduktion wurde für die Jungpflanzenanzucht mit UV-transparenten Bedachungsmaterialien gearbeitet, um Freilandbedingungen simulieren zu können. Dadurch wurden kompakte Jungpflanzen produziert, die an Freilandbedingungen angepasst waren und sich im Freiland ohne Beeinträchtigung weiterentwickeln konnten (KAUFMANN 2006). Aber auch in der Anzucht von Zierpflanzen wurde schon gezielt mit UV-transparenten Bedachungsmaterialien gearbeitet. Untersuchungen von HOFFMANN (1999a) ergaben, dass die Blattfarbe buntlaubiger Pflanzenarten durch UV-Strahlung positiv beeinflusst wurde. Es war zudem eine Verstärkung in der Blütenfarbe zu beobachten, was den Zierwert der Ware steigerte. Weiterhin konnten in der Produktion von Zierpflanzen UV-transparente Bedachungsmaterialien eingesetzt werden, um das Streckungswachstum zu hemmen (HOFFMANN 1999b).

2.4.4 Stressreaktionen auf multiple Belastung

Stressreaktionen auf einen Stressor zu reduzieren ist jedoch äußerst problematisch, da die Reaktionen von Pflanzen sehr komplex sind (ATKINSON & URWIN 2012) und nicht selten Symptomanalogien auftreten. Demnach können die unter 2.4.1 beschriebenen Reaktionen des Turgorverlustes auch eine Reaktion auf den Stressor Hitze sein (BRUNOLD et al. 1996). Daneben kann der Turgorverlust auch eine Antwort auf die Kombination beider Stressoren, Hitze und Wassermangel, einen sogenannten multiplen Stress, sein (SCHULZE et al. 2005).

Nach SCHULZE et al. (2005) besagt die Definition von multipltem Stress, dass nicht nur der Einfluss mehrerer Stressoren auf die Pflanze, sondern auch eine Verkettung von sekundären Stressoren nach einem primären Stressor als multipler Stress zu bezeichnen ist. Dazu gehört unter anderem das Schließen der Stomata, was zu einer Reduzierung der CO₂-Aufnahme und zu einer gehemmten Photosyntheserate führt, wenn eine Trockenstress-situation vorausgegangen war. Laut WITUSZYŃSKA und KARPINSKI (2013) kann ebenso eine hohe Strahlungsintensität zu einer überschüssigen Anreicherung von Strahlungsenergie führen, die nicht nur den Photosynthesefluss beeinträchtigt, sondern auch das Wasserpotential der Pflanze verändert, wenn sich dadurch die Stomata verengen. Dies führt ebenso zu einer Erhöhung der Blatttemperatur und zu einer Anreicherung von ABA und Hitzeschockproteinen. Zudem erhöht sich der Gehalt an ROS, die eine Photoinhibition verursachen und somit einen programmierten Zelltod hervorrufen (WITUSZYŃSKA & KARPINSKI 2013). Demzufolge sind Stressreaktionen im Freiland immer eine Reaktionen auf multiplen Stress, da entweder mehrere Stressoren zu einer Stressbelastung führen oder Stressoren miteinander verkettet sind (SCHULZE et al. 2005). Komplizierter wird diese Annahme durch die These von ATKINSON und URWIN (2012), die besagt, dass durch abiotische Stressoren eine Aktivierung von Hormonen in der Pflanze stattfinden kann, die auch durch biotische Stressoren aktiviert werden. Demnach kommt es bei einem multiplen Stress zu einer Signalübertragung und zu einer Cross-Toleranz (HEß 2008). So kann die durch einen abiotischen Stressor angeregte Bildung von antioxidativen Enzymen somit auch bei einem nachfolgenden Stressor wirksam sein (ATKINSON & URWIN 2012). Eine inhaltsstoffliche Untersuchung zur Identifizierung von Stressoren kann somit durch diesen multiplen Stress erschwert werden.

2.4.5 Stressreaktionen am Beispiel von *Impatiens Neuguinea*

Impatiens Neuguinea haben eine lang zurückliegende Züchtungsgeschichte. Im Jahre 1886 wurden sie erstmals in Europa eingeführt, konnten sich aber noch nicht durchsetzen. Erst durch die Initiative von Longwood Gardens und dem United States Department of Agriculture

(USDA), die Kreuzungseltern aus Neuguinea mitbrachten, wurden sie wiederentdeckt (BENJAMIN 1990). Auf Grund der Herkunft der Kreuzungseltern eignen sich *Impatiens* Neuguinea als Versuchspflanze sehr, da sie auf hohe Strahlungsintensitäten, niedrige und hohe Temperaturen und niedriges Wasserangebot reagiert (AMBERGER-OCHSENBAUER 2014; BLANCHARD et al. 2012; BLANUSA et al. 2009; HAVER & SCHUCH 1996; KRATO 2012; LANGKAMP & SPINAROVA 2014; TREDER & NOWAK 2001a; TREDER & NOWAK 2001b). Hohe Strahlungsintensitäten und hohe Temperaturen führen bei *Impatiens* Neuguinea nicht nur dazu, dass sie schnell an Wasserstress leiden und welken (STREFELER & QUENÉ 1995), sondern auch dazu, dass sie nach kurzer Zeit nekrotische Blattflächen an sonnenexponierten Blättern zeigen (LANGKAMP & SPINAROVA 2014). Auf den Stressor Kälte reagieren *Impatiens* Neuguinea nach AMBERGER-OCHSENBAUER (2014) ebenfalls mit irreversiblen Stressreaktionen. Nach niedrigen Tagesmitteltemperaturen zwischen 4 °C und 8 °C zeigten diese an jungen Blättern Chlorosen und an älteren Blättern braunrote Verfärbungen der Blattflächen, seitlich nach unten eingerollte oder spiralig gedrehte Blätter, Nekrosen an Blattspitzen und -rändern sowie Blatt- und Blütenfall (AMBERGER-OCHSENBAUER 2014). In Untersuchungen von KRATO (2012) konnte nachgewiesen werden, dass *Impatiens* Neuguinea Stressreaktionen in Form von starken Welkeerscheinungen nach einer längeren Phase mit Trockenstress aufweisen. Dabei zeigte sich nicht nur ein Erschlaffen der Blätter durch Turgorverlust (ERNST 2009; STREFELER & QUENÉ 1995), sondern auch eine Farb- und Strukturveränderung (KRATO 2012). Des Weiteren wurde festgestellt, dass das Wasserangebot in der Anzuchtphase das Welkeverhalten stark beeinflussen kann. Pflanzen, die mit einem geringen Wasserangebot kultiviert wurden, zeigten bis zu einem Tag später Welkeerscheinungen, als Pflanzen, die mit einem hohen Wasserangebot kultiviert wurden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass diese trockene Kulturführung auch einen Einfluss auf den Habitus der Pflanze hatte. Es zeigten sich kleinere Blätter, was primär das Welkeverhalten beeinflusst hat. Des Weiteren verfügen *Impatiens* Neuguinea über ein großes Rehydrierungspotential. So können sich aus einer scheinbar irreversiblen Welke wieder vollständig regenerieren (KRATO 2012; STREFELER & QUENÉ 1995).

Die bis dato beschriebenen Stressreaktionen beliefen sich bisweilen auf Stressreaktionen, die zu reversiblen und irreversiblen Schädigungen führten, wie Chlorosen, Nekrosen, programmierter Zelltod und Welke. Darüber hinaus gibt es jedoch Reaktionen, die einer Anpassung an aktuelle Bedingungen gleich kommen. In Untersuchungen von TREDER und NOWAK (2001b) reagierte die Sorte 'Timor' der *Impatiens* Neuguinea nach einer trockenen Kulturführung mit kleineren Pflanzen und einer geringeren Blattfläche. Die größte Blattfläche und das stärkste Wachstum wurde mit einer Bewässerung ab einem Wasserpotential von 10 mbar und 30 mbar beobachtet (HAVER & SCHUCH 1996; TREDER & NOWAK 2001b).

Ebenso reagierten *Impatiens* Neuguinea auf eine geringe Wassergabe mit einer Reduzierung der Blütenzahl um 75 % (BLANUSA et al. 2009). Weiterhin konnten starke Reaktionen auf die Temperatur bei der Anzucht beobachtet werden. Bei einem Einsatz eines Energieschirmes war die Temperatur der Triebspitzen in der Nacht um bis zu 2,3 °C höher als ohne Energieschirm, was die Entwicklung beschleunigte (BLANCHARD et al. 2012).

2.5 Schutzmechanismen gegenüber Strahlungsstress bei Kulturpflanzen

Evolutionsbedingt haben Pflanzen im Zuge der erlebten Belastungssituationen Schutzmechanismen entwickelt, mit denen sie sich an die Bedingungen anpassen können oder mit denen sie sich selbst rehabilitieren können. Laut LARCHER (2001) können Pflanzen daher das Strahlungsangebot in ihrem Lebensraum qualitativ und quantitativ wahrnehmen und sich an die vorherrschenden Bedingungen modulativ, modifikativ und evolutiv anpassen. Darüber hinaus können Pflanzen Reparaturmechanismen anwenden, wenn eine Anpassung an eine Stressbelastung nicht ausreichend war und es zur Bildung und Schädigung von und durch ROS kommt. Dieser Fall tritt nach dem Phasenmodell von SELYE (1936) ein, wenn die Dauer und die Intensität der Stressbelastung das natürliche Anpassungs- und Resistenzverhalten einer Pflanze überschreitet (Abb. 1 Seite 4). Das folgende Kapitel befasst sich mit den Schutzmechanismen, die an Kulturpflanzen beobachtet wurden, um sich an Strahlungsstress anzupassen oder um sich nach einer Schädigung zu rehabilitieren.

2.5.1 Anpassungsmechanismen an Strahlungsstress

Die modulative Anpassung entsteht rasch und ist reversibel. Sie berücksichtigt die funktionelle Flexibilität der Pflanze. Je höher diese ist, desto rascher kann die Pflanze auf akute Stressbelastungen reagieren. Kehrt nach einer Stressbelastung die Ausgangssituation zurück, so nimmt die Pflanze ihr Ausgangsverhalten wieder ein (LARCHER 2001). Zu den raschen und reversiblen Anpassungsmechanismen an hohe Strahlungsintensitäten zählen unter anderem die nastischen Bewegungen der Blätter zu einer für die Pflanze günstigeren Exposition zur Strahlungsquelle und das Einrollen und Kräuseln der Blätter zur Minimierung der Blattfläche (JANSEN et al. 1998) sowie das tagesperiodische Öffnen und Schließen mancher Blüten (WEILER & NOVER 2008). Aber auch die Verlagerung der Chloroplasten an die Seitenwände der Zelle, wie es von DAY und VOGELMANN (1995) an Erbsen unter einer erhöhten UV-B-Belastung beobachtet wurde, und das Schließen der Stomata bei hohen Strahlungsintensitäten, was bei Sonnenblumen zu einer Minimierung der Photosyntheserate führte (BOYER 1971), gehören zu den modulativen Anpassungsmöglichkeiten von Pflanzen.

Nach LARCHER (2001) beinhaltet die modifikative Anpassung die strukturellen Differenzierungsmöglichkeiten des Pflanzengewebes. Es handelt sich somit um eine irreversible Veränderung des Gewebes. Da die Anpassung unter den Strahlungsbedingungen während des Heranwachsens des jeweiligen Pflanzengewebes geschieht, wird diese auch als die phänotypische Anpassung bezeichnet (LARCHER 2001). Eine bekannte Anpassungsform von Pflanzen an hohe Strahlungsintensitäten ist die Bildung von kleineren und dickeren Blättern (ATANASOVA et al. 2003; GIVNISH 1988). Weitere Untersuchungen zeigten, dass Pflanzen in der Lage sind, sich mit einer dickeren Epidermis und Wachsschicht zu schützen (JANSEN et al. 1998; RAHIM & FORDHAM 1991). Die Ausbildung von Blatthaaren zur Reflexion der Strahlung (HOLMES & KEILLER 2002) sowie eine geringere Internodienlänge und eine höhere Verzweigungsrate (JANSEN et al. 1998; MORGAN et al. 1980; ROZEMA et al. 1997), gehören ebenfalls zu den modifikativen Anpassungsmechanismen einer Pflanze an hohe Strahlungsintensitäten. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die bereits erwähnte Synthese und Verlagerung von Anthocyanen als Schutzpigmente. Die modulative Anpassung ist jedoch keine vererbte Anpassung. Verändern sich die Umweltbedingungen, entwickelt der Spross neue Blätter, die wieder an die neuen Bedingungen angepasst sind. Nicht mehr angepassten Blätter werden dann oftmals von der Pflanze abgestoßen (LARCHER 2001).

Eine dritte Anpassungsmöglichkeit von Pflanzen ist die evolutive Anpassung. Diese Anpassungsart ist gleichzusetzen mit der genotypischen Plastizität und ist somit erblich verankert. Damit ist diese Art der Anpassung, anders als bei den beiden zuvor genannten Anpassungsarten, eine Anpassung, die vom Genotyp und nicht durch Umwelteinflüsse bestimmt wird. Evolutive Anpassung beinhaltet die Einteilung der Pflanzen als Dämmerlicht-, Schatten-, Sonnen- und Starklichtpflanzen. Zwar sind Sonnenpflanzen an Schattenbedingungen adaptierbar, aber nicht in dem Maße wie genetisch programmierbare Schattenpflanzen. Daher geht es bei der evolutive Anpassung um die erblich festgelegte Reaktionsnorm (LARCHER 2001).

2.5.2 Reparaturmechanismen von Strahlungsstressreaktionen

Wenn diese genannten Anpassungsmechanismen nicht ausreichend greifen, kann es zu einer erhöhten Bildung von ROS oder zu einer durch UV-B-Strahlung induzierten Dimerisierung von Thyminbasen kommen. In beiden Fällen sind die Pflanzen in der Lage, sich selbst zu entgiften und zu rehabilitieren.

Bei der Entgiftung der Pflanzenzellen von ROS spielen antioxidative Enzyme eine wichtige Rolle. Darunter auch das Enzym Superoxiddismutase (SOD). Es befindet sich im Stroma

und im Lumen der Chloroplasten und lässt das reaktive Superoxidradikal ($\text{O}_2^{\cdot-}$) zu Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und molekularem Sauerstoff reagieren. Weitere Enzyme, die dazu befähigt sind, ROS zu entgiften, sind die Katalase, die Glutathion-Peroxidase (GPX), die Glutathion-Reductase (GR) und das Peroxiredoxin (PR). Diese Enzyme werden auf Grund ihrer endogenen Schutzfunktion auch als Scavenger-Enzyme bezeichnet. Sie befinden sich in den Mitochondrien, Plastiden, Peroxisomen und im Cytoplasma oder werden dort vermehrt durch oxidativen Stress gebildet (ARORA et al. 2002; MITTLER 2002; WEILER & NOVER 2008; ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004). Untersuchungen an *Begonia x erythrophylla* und an Weizen bestätigten, dass der Gehalt von Katalase und anderen antioxidativen Enzymen in Schattenblättern nach einem Transfer in die Sonne signifikant anstieg (BURRITT & MACKENZIE 2003; GRIMME 2006).

Die enzymatische Reparatur der durch UV-Strahlung dimerisierten Thyminbasen kann entweder durch Photoreaktivierung mit einer DNS-Photolyase oder durch eine Nucleotid-Excisionsreparatur von Endonucleasen stattfinden. Bei der Photoreaktivierung mit einer DNS-Photolyase bindet sich das Enzym an das Dimer. Durch Strahlung im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 600 nm wird die Photolyase aktiv, spaltet das Dimer und die natürliche DNS-Struktur ist wieder hergestellt (BATSCHAUER 1993; BECK 2005; BRITT 1996; HEARST 1995). Bei der Nucleotid-Excisionsreparatur wird der Abschnitt mit dem Dimer und einigen seiner Nachbar-Nucleotide entfernt, so dass eine einzelsträngige Lücke entsteht. Diese Lücke wird anschließend von einer DNS-Polymerase aufgefüllt. Eine DNS-Ligase stellt dann das durchlaufende Polynucleotid wieder her (BRITT 1996; KIMURA & SAKAGUCHI 2006; SINHA & HÄDER 2002).

2.6 Methoden zur Identifizierung von Stress bei Kultur- und Zierpflanzen

Aus den vorangegangenen Kapiteln ist zusammenfassend festzustellen, dass abiotische Stressbelastungen vorliegen, wenn diese nicht dem Optimum der Pflanze entsprechen. Zudem kann abgeleitet werden, dass an Pflanzen eine Stresstoleranz identifiziert werden kann, wenn diese die Bedingungen ohne Einbußen von Ertrag und Qualität überdauern. Das folgende Kapitel befasst sich nun mit den Methoden, die in der Literatur aufgezeigt werden, um Stressbelastungen an Kultur- und Zierpflanzen zu identifizieren.

Stressreaktionen können sich in sichtbaren Reaktionen äußern oder auf zellulärer Ebene verborgen bleiben. Daher lässt sich eine Stresssituation an Pflanzen sowohl an Hand morphologischer und anatomischer Merkmale feststellen als auch an Hand von physiologischen Merkmalen, sekundären Inhaltsstoffen und enzymatischen Reaktionen. Die Erfassung morphologischer und anatomischer Merkmale kann durch eine Bewertung der

Pflanzenqualität mit Hilfe von Boniturnoten erfolgen. Als Beispiel ist die Bewertung physiologischer Blattflecken an Sommergerste (ZAHN 2005) und Weizen (GRIMME 2006) oder die Bewertung von Welkeerscheinungen an *Impatiens Neuguinea* unter Trockenstress (KRATO 2012) zu nennen. Es ist aber auch möglich, die Tage vom Einsetzen des Stresses bis zum Erkennen der Stressreaktion zu zählen (STREFELER & QUENÉ 1995).

Darüber hinaus ist es möglich, die Stressbelastung einer Pflanze an Hand der gebildeten antioxidativen Enzyme festzustellen, in dem diese extrahiert und analysiert werden (BURRITT & MACKENZIE 2003). Eine andere Möglichkeit ist, den Gehalt an ROS direkt zu erfassen (GRIMME 2006). Die Interpretation der Daten wird jedoch dadurch erschwert, dass der Anteil an antioxidativen Enzymen entweder als Indikator für die Intensität des Stressors oder als Indikator für die Toleranz des Genotyps dienen kann. Laut GRIMME (2006) lässt eine hohe Aktivität von antioxidativen Enzymen auf eine hohe Akkumulation von ROS schließen, was mit dem Auftreten von nicht-parasitären Blattflecken übereinstimmt und somit auf eine geringe Stresstoleranz der getesteten Sorten schließen lässt (GRIMME 2006).

Eine weitere Methode, die zur Identifizierung von Stress angewendet werden kann, ist die Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz. Damit lässt sich die maximale Quantenausbeute des PSII (F_v/F_m) der Pflanze erfassen. Außerdem lässt sich so der Anteil an Energie bestimmen, der chemisch (qP) genutzt wird, oder durch Fluoreszenz (qN) oder Wärme (NPQ) abgegeben wird (BORKOWSKA 2006). Verfolgt wird dabei die Identifizierung von Pflanzen mit einer geringen Fluoreszenz, da bei diesen Pflanzen die Übertragung von überschüssiger Energie auf molekularen Sauerstoff so gering wie möglich ist (GRIMME 2006). Aber auch die maximale Quantenausbeute des PSII (F_v/F_m) ist ein bedeutender Parameter. Grenzwerte unter einem Index von 0,76 deuten auf eine gehemmte Aktivität der Photosynthese, bzw. auf eine Schädigung des Photosyntheseapparates hin. In Untersuchungen mit *Dendranthema grandiflora* konnte gezeigt werden, dass sich F_v/F_m zur Überprüfung einer Belastungssituation durch hohe Temperaturen eignet (JANKA et al. 2013). Auch an krautigen mehrjährigen Stauden, die unter Trockenstress stehen, kann die Messtechnik erfolgreich eingesetzt werden (STARMAN & LOMBARDINI 2006).

Weiterhin ist bekannt, dass Stressbelastungen, auf die die Pflanzen mit dem Schließen der Stomata reagieren, die Pflanzentemperatur stark beeinflussen können. Dieser Effekt ist mit Hilfe der digitalen Infrarot-Thermographie messbar, da hiermit die Temperatur von Objekten in Thermalbildern festgehalten wird. Aus diesen Thermalbildern kann anschließend ein Stressindex berechnet werden, der zwischen 0 und 1 liegt. Bekannt ist dieser Stressindex als Crop Water Stress Index (JACKSON et al. 1981). Die Thermographie als Messmethode kam bereits in der Identifizierung von Pathogenbefall (GEBHARDT 1984; HEINRICH 2009; STOLL et al. 2008) und in der Identifizierung von Hitzestress an Weizen zum Einsatz (AYENEH et al.

2002; LENTHE 2005). Ein großer Anwendungsbereich der Thermographie ist zudem die Identifizierung von Trockenstress zur Steuerung von Bewässerungsanlagen (JONES 1999a; JONES et al. 1997; JONES et al. 2009; JONES et al. 2002; NILSSON & LINNÉR 1987; WANG & GARTUNG 2010). Auch an Zierpflanzenkulturen wie *Dendranthema grandiflora* wurde die Thermographie bereits zur Identifikation von Trockenstress eingesetzt (JANKA et al. 2013).

Zur Identifikation einer Stresssituation gibt es darüber hinaus auch die Möglichkeit, die Stomatafunktion und die Photosyntheserate mit Hilfe des Gaswechsels zu bestimmen. Der mit dem Gaswechsel der Pflanze erfasste Parameter der stomatären Leitfähigkeit dient als Maß für die Öffnungsweite der Stomata. Je niedriger der Wert der stomatären Leitfähigkeit, desto mehr sind die Stomata der Pflanze geschlossen (WEILER & NOVER 2008). Diese Messmethode findet daher Anwendung in der Identifikation von Trockenstress und wurde bereits an Bohnen, Erbsen und krautigen Stauden getestet (ANYIA & HERZOG 2004; CHOINSKI & JOHNSON 1992; NOGUÉS et al. 1998; ZOLLINGER et al. 2006). Die Messung des Gaswechsels kann zudem eingesetzt werden, um das Anpassungspotential des Photosyntheseapparates an Lichtintensitäten in Form von Sättigungskurven zu bestimmen oder den aktuellen Ist-Zustand bei aktuellem Strahlungsangebot und den vorherrschenden Umweltbedingungen zu charakterisieren (CHABOT & FINCHER CHABOT 1977; FINI et al. 2010a; FINI et al. 2010b; JIFON & SYVERTSEN 2003; SANUSI et al. 2011; WIEBEL et al. 1994).

3. Kenntnislücken und Zielsetzung

Die vorangegangene Literaturanalyse zeigt, dass der Stressor Trockenstress intensiv bearbeitet worden ist. Im Gegensatz hierzu gibt es für Strahlungsstress bis dato noch keine spezifische Auseinandersetzung an Kultur- und Zierpflanzen. Zudem fanden die meisten Untersuchungen in Klimakammern unter kontrollierten Bedingungen statt. Untersuchungen im Freiland sind nicht weit verbreitet. Auch gibt es keine praxisverwertbaren Prüfstände mit einfacher technischer Umsetzung für ein Screening auf Strahlungsstresstoleranz. Dies würde voraussetzen, dass die Mechanismen einer Strahlungsstresstoleranz bereits identifiziert wurden. Zudem werden zwar die Thermographie und der Gaswechsel als Frühwarnsystem bei Trockenstress eingesetzt, unklar ist jedoch, ob diese Methode auch bei Strahlungsstress eingesetzt werden kann. Zumal dem Strahlungsstress auf Grund der Symptomanalogien vielfach ein Zusammenhang zwischen Trocken- und Hitzestress unterstellt wird. Fraglich ist daher, ob eine systematische Symptombeschreibung von Strahlungsstressreaktionen möglich ist und ob diese nicht nur morphologisch, sondern auch physiologisch erkennbar sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, einen Prüfstand zur Untersuchung der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens*-Genotypen im Freiland zu entwickeln. Begleitet wird dies durch die Entwicklung von Boniturmustern zur Charakterisierung und systematischer Beschreibung von Strahlungsstressreaktionen. Zudem werden während der Stressapplikation bekannte physiologische Messmethoden, wie Thermographie, Gaswechsel und Chlorophyll-Fluoreszenz, angewendet und mit morphologischen Reaktionen auf dem Prüfstand verglichen. Des Weiteren werden vor der Stressapplikation morphologische Pflanzenmerkmale erfasst, um Auskunft über einen möglichen Einfluss der Anzuchtbedingungen auf eine spätere Strahlungsstresstoleranz geben zu können. Aus diesen Daten soll anschließend eine Identifizierung von Strahlungsstressreaktionen unter Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale stattfinden und Toleranzmerkmale für Strahlungsstress an *Impatiens*-Genotypen identifiziert und festgehalten werden.

4. Arbeitsypothesen und Versuchsfragen

Die Erstellung von Arbeitsypothesen hilft bei der Bearbeitung von wissenschaftlichen Fragestellungen. Um die vorangestellte und beschriebene Zielsetzung mit der vorliegenden Arbeit einzuhalten, wurden folgende Arbeitsypothesen formuliert:

- SunPatiens sind strahlungsstresstoleranter als *Impatiens* Neuguinea!
- Stresstoleranz wird durch die Anzuchtbedingungen modifiziert!
- Strahlungsstresstolerante Genotypen haben prinzipiell einen kompakteren Pflanzenaufbau, eine geringere spezifische Blattfläche und somit dickere Blätter und eine höhere phänotypische Plastizität!
- Strahlungsstresstolerante Genotypen haben unter Stress eine bessere Regelung des Wasser- und Wärmehaushaltes!

Daraus ergeben sich folgende Versuchsfragen, die bei der Bearbeitung des Themas, „Beiträge zur Charakterisierung von Strahlungsstressreaktionen am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen unter der Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale“, sukzessiv beantwortet werden:

- Was sind typische Strahlungsstressschäden an *Impatiens*?
- Gibt es im Sortiment der *Impatiens* strahlungsstresstolerante Genotypen?
- Welche Merkmale weisen strahlungsstresstolerante Pflanzen unter Stress auf?
- Welche Merkmale der Strahlungsstresstoleranz werden durch die Bedingungen während der Anzucht modifiziert?

5. Material und Methoden

Zur Untersuchung von Strahlungsstressreaktionen und zur Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz an *Impatiens*-Genotypen wurden ausgewählte morphologische, anatomische und physiologische Pflanzenmerkmale erhoben. Dafür wurden in den Jahren 2012, 2013 und 2014 insgesamt 5 Vegetationsversuche durchgeführt, in denen die Versuchspflanzen nach einer Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot allgemeinem Strahlungsstress, UV-Stress und einem multiplen Stress aus Trocken- und Strahlungsstress unterworfen wurden. Neben den optisch wahrnehmbaren Reaktionen, wie Welke und Nekrosen, wurden unter anderem auch Pflanzentemperatur, Gaswechsel und Chlorophyll-Fluoreszenz ermittelt, die nachfolgend zu den optisch sichtbaren Schadsymptomen in Beziehung gesetzt wurden. Ziel war dabei, die Prüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Pflanzenmerkmalen und Stresstoleranz, sowie die Genotypen hinsichtlich ihrer Stresstoleranz zu charakterisieren. Im Folgenden werden die hierzu eingesetzten Methoden näher erläutert.

5.1 Pflanzenmaterial

Impatiens Neuguinea wurden 1983 in den deutschen Markt eingeführt (HORN 1996) und gehören seither zum Stammsortiment und laut AMI (2012) zu den beliebtesten 10 Beet- und Balkonpflanzen. Gründe für ihre Beliebtheit sind ihre Farbenpracht und ihre Blühwilligkeit. Allerdings werden sie als sehr klimastress- und darunter besonders trockenstressempfindlich eingestuft (ERNST 2009; KRATO 2012). Im Jahr 2006 wurde von dem japanischen Züchter SAKATA ein neuer Typ mit dem Trivialnamen SunPatiens in den deutschen Markt eingeführt (KILLGUS 2006). Dabei handelt es sich um einen interspezifischen Typ der *Impatiens* (FISCHER-KLÜVER 2011), die laut Züchter über eine hohe Klimastresstoleranz verfügt (SAKATA 2011). Auf Grund dieser zwei Typen ist die Gattung *Impatiens* eine geeignete Versuchspflanze zur Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz an Beet- und Balkonpflanzen.

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz fünf marktbedeutende Sorten ausgewählt. Aus der Serie Paradise die drei Sorten 'Logia', 'Moorea' und 'Timor', die nachfolgend als klassische *Impatiens* bezeichnet werden, und aus der Serie SunPatiens die zwei Sorten 'Magenta' und 'Orange' (Tab. 2). Die Sorten 'Moorea' und 'Timor' wurden bereits im Rahmen eines Trockenstressprojektes an der ehemaligen Forschungsanstalt Geisenheim verwendet (KRATO 2012). Die Sortenauswahl wurde somit aus den Untersuchungen von KRATO (2012) unterstützt, die die Sorte 'Moorea' als eher empfindlich und die Sorte 'Timor' als eher tolerant auf Trockenstress eingestuft hat. Dadurch sind neben den klassischen *Impatiens* und der SunPatiens auch innerhalb der klassischen

Impatiens zwei kontrastierende Sorten für den Parameter Trockenstress in den Versuchsaufbau eingegliedert worden. Nachfolgend werden die Pflanzen in Abbildungen und Tabellen mit „ImP“ für klassische *Impatiens* und „SunP“ für SunPatiens abgekürzt.

Tab. 2: Pflanzenmaterial für die Charakterisierung von Strahlungsstresstoleranz

Gattung	Serie	Sorte	Blüte	Laub	Abkürzung
<i>Impatiens</i> Neuguinea	Paradise	'Logia'	purpur	glänzend grün	ImP 'Logia'
<i>Impatiens</i> Neuguinea	Paradise	'Moorea'	weiß	glänzend grün	ImP 'Moorea'
<i>Impatiens</i> Neuguinea	Paradise	'Timor'	orangerot	glänzend grün	ImP 'Timor'
<i>Impatiens</i>	SunPatiens	'Magenta'	magenta	matt grün behaart	SunP 'Magenta'
<i>Impatiens</i>	SunPatiens	'Orange'	orange	dunkelgrün	SunP 'Orange'

5.2 Pflanzenanzucht

5.2.1 Allgemeine Kulturbedingungen

Als Jungpflanzen wurden die fünf oben beschriebenen Sorten vom Produzenten Kientzler bezogen und nach Anlieferung unter Verwendung des Substrats ED 73 der Firma Patzer in 11er Teku VCD Töpfe getopft. Anschließend bei 16 °C Heiz- und 18 °C Lüftungstemperatur aufgestellt und für etwa 10 Wochen auf marktfähige Pflanzengröße herangezogen. Während der Anzucht wurde die Substratfeuchte bei allen Genotypen mit Tensiometern kontrolliert und bei Überschreitung der Saugspannung von 150 hPa bewässert. In 2012 fand eine Bewässerungsdüngung mit 0,75 g/l Ferty-3-Mega (nitratbetonter Mehrnährstoffdüngers mit einem Gesamtstickstoffgehalt von 18 % N) statt. In 2013 und 2014 erfolgte einer wöchentlichen Intervalldüngung mit 1 g/l Ferty-3-Mega. Grund für diese Methodenumstellung war, dass es bei einer Bewässerungsdüngung zu häufigeren Bewässerungsvorgängen infolge einer höheren Transpirationsrate der unschattierten Pflanzen kam und somit zu einer höheren Nährstoffzufuhr in dieser Anzuchtvariante.

5.2.2 Variation des Strahlungsangebotes

Eine Woche nach Topftermin wurden die Versuchspflanzen im Gewächshaus in zwei Abteilungen aufgeteilt und bei unterschiedlichem Strahlungsangebot angezogen. Damit sollte zum einen das Anpassungspotential der Genotypen charakterisiert werden und zum anderen der Einfluss der Einstrahlung während der Anzucht auf das Stressverhalten im Freiland

studiert werden. Für dieses Vorhaben wurde mit einer fest installierten Schattierung ein Gewächshaus in zwei Abteilungen unterteilt. Das Schattiergewebe, welches in der Praxis als Energieschirm dient, sorgte für eine Strahlungsminderung um fast 70 % der ins Gewächshaus einfallenden natürlichen Sonnenstrahlung. Als Vergleich dazu diente eine unschattierte Abteilung, in der die Versuchspflanzen 100 % der ins Gewächshaus einfallenden Strahlung ausgesetzt waren (Abb. 2). Die Messungen des Strahlungsangebotes erfolgten in Höhe des Pflanzenbestandes.

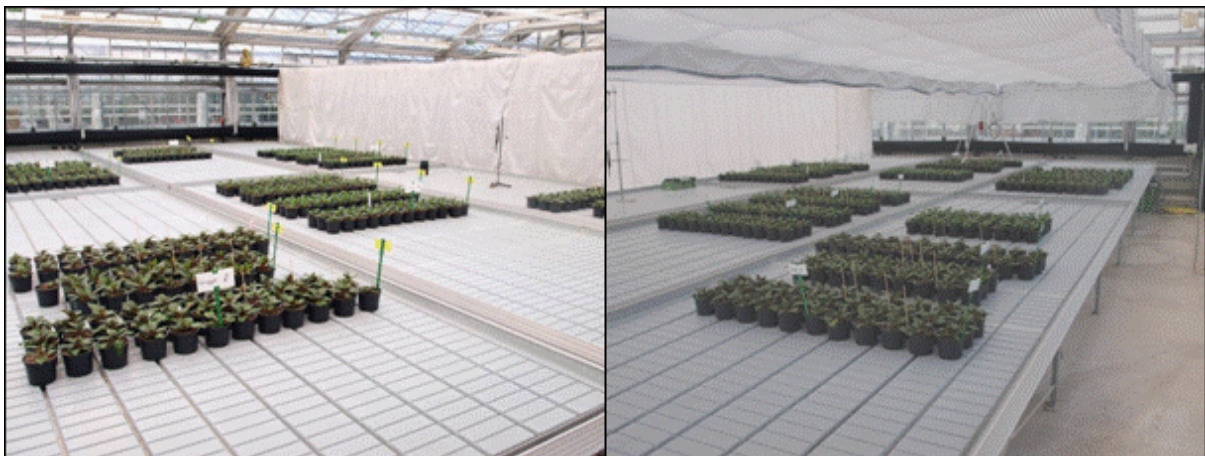


Abb. 2: Unterschiedliches Strahlungsangebot zum Studium des Anpassungspotentials der Genotypen und des Verhaltes während einer späteren Stressphase im Freiland

Tab. 3: Bedingungen während der Anzucht

Zeitraum		Tagesmitteltemperatur [°C]		relative Luftfeuchte [%]		PAR am Tag [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$]	
		unschattiert	schattiert	unschattiert	schattiert	unschattiert	schattiert
2012	Satz 1	19,6	19,1	51	52	264	86
	Satz 2	23,1	22,4	53	58	289	88
2013	Satz 1	18,5	18,4	47	49	247	74
	Satz 2	23,0	22,6	59	59	280	89
2014	Satz 1	20,8	20,1	55	53	294	92

Die Tagesmitteltemperatur lag je nach Satz zwischen 18,4 °C und 23,1 °C und die relative Luftfeuchte zwischen 51 % und 59 % (Tab. 3). Wie zu erkennen ist, sind die Unterschiede innerhalb des jeweiligen Satzes zwischen der unschattierten und schattierten Anzucht sehr gering. Unterschiede in den Sätzen zeigt lediglich die PAR am Tag von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang in Höhe des Pflanzenbestandes. Unterschiede im Pflanzenhabitus (Abb. 3) sind daher auf das Strahlungsangebot zurückzuführen. Die quantitative Beschreibung ist Hauptbestandteil der Arbeit und folgt im Kapitel Ergebnisse.



Abb. 3: Pflanzenaufbau verschiedener *Impatiens*-Genotypen im Versuchsjahr 2012 nach einer 10-wöchigen Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot

5.3 Prüfstand zur Untersuchung von Strahlungsstress

Wie zuvor beschrieben, sind Strahlungsstresssymptome nach heutigem Kenntnisstand Reaktionen auf eine zu hohe Energiebelastung (MITTLER 2002) mit der Folge einer Überhitzung des Pflanzengewebes und/oder spezifische Schadreaktionen durch UV-Strahlung (KARABOURNIOTIS et al. 1993). Weiterhin wird angenommen, dass Trockenstress und Strahlungsstress häufig miteinander gekoppelt sind, da nach BRUNOLD et al. (1996) beide Parameter den Energiehaushalt einer Pflanze beeinflussen. Die Wasserversorgung

der Versuchspflanzen ist daher ein wichtiger Faktor und macht die Charakterisierung einer Strahlungstoleranz daher sehr komplex. Neben einem Freilandprüfstand wurde aus diesem Grund auch ein Kunstlichtprüfstand unter kontrollierten Bedingungen in den Versuchsaufbau mit einbezogen.

5.3.1 Freilandprüfstand

5.3.1.1 Untersuchungen zur Gestaltung des Freilandprüfstandes

Im Rahmen der Arbeit wurde in Vorversuchen die Freilandtauglichkeit eines ersten Prüfstandes getestet. Bei diesem Vorversuch wurden Testpflanzen nach Ankündigung einer strahlungsreichen Wetterlage ungeschützt ins Freiland ausgestellt. Bereits nach vier bis fünf Stunden wiesen die Pflanzen eine starke Welke auf (Abb. 4), aber es zeigten sich keine Symptome, die auf Strahlungsstress zurückzuführen waren. Zudem war die Welke einiger Pflanzen so stark, dass mögliche Strahlungstresssymptome überlagert wurden. Erst nach mehrmaligem Bewässern am Tag waren Strahlungstresssymptome zu erkennen. Daraufhin wurde ein Prüfstand mit einem größeren Substratvolumen und somit einer besseren Wasserversorgung entwickelt.



Abb. 4: Testpflanzen SunP 'Magenta' (links) und ImP 'Moorea' (rechts) im 11er Topf nach vier Stunden im Freiland unter hohem Strahlungsangebot ohne Nachwässerung

5.3.1.2 Wasserversorgung während der Stressapplikation

Wie der genannte Vorversuch zeigte, muss die Wasserversorgung so gestaltet werden, dass sowohl eine gleichmäßige Austrocknung als auch eine gleichmäßige Nachlieferung mit Wasser stattfinden kann. Pflanzgefäße mit einem Substratvolumen von 20 l und einem Wasserreservoir konnten diese Voraussetzung optimal erfüllen. Anders als bei der Anzucht erfolgte die Bewässerung der Pflanzgefäße nach einem gravimetrischen Prinzip. Täglich wurden alle Pflanzgefäße mit einer Hängewaage gewogen. Mit Hilfe von parallelen Messungen mit Tensiometern wurde eine Eichgerade erstellt. Diese Eichgerade zeigt, dass ein Systemgewicht aus Pflanzgefäß, Substrat und Pflanzen von 6,5 kg einer Saugspannung des Substrates von 95 hPa entspricht. Diese 6,5 kg wurden als kritischer Wert angenommen, ab dem das Wasserreservoir des Pflanzgefäßes mit 2 l Wasser aufgefüllt wurde. Eine Anpassung des kritischen Wertes an eine Zunahme des Pflanzenfrischgewichtes erfolgte nicht. Da die Stressapplikation auf 7 bis 10 Tage beschränkt wurde, wurde eine Zunahme des Pflanzenfrischgewichtes ausgeschlossen.

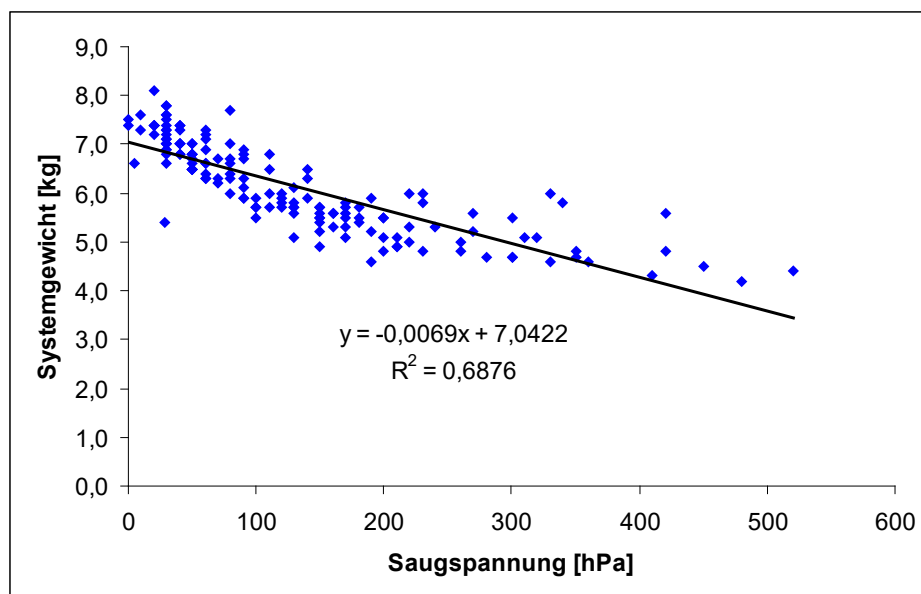


Abb. 5: Eichgerade zur Bewässerung der Pflanzgefäße während der Stressapplikation

5.3.1.3 Stressapplikation auf einem Freilandprüfstand

Beginn der Stressapplikation auf einem Freilandprüfstand war bei einer Wetterlage mit hoher Einstrahlung ohne Niederschlag, die vier bis sieben Tage stabil blieb. Bei Ankündigung dieser Wetterlage wurden je Sorte und Anzuchtvariante acht Pflanzgefäße mit dem Substrat ED 73 plus + Eisen der Firma Patzer befüllt, mit fünf Versuchspflanzen bepflanzt (Abb. 6) und auf die vier unterschiedlichen Varianten des Prüfstandes verteilt (Tab. 4).



Abb. 6: Regensichere Pflanzgefäße mit 5 Pflanzen in mehrfacher Wiederholung

Die erste Variante des Prüfstandes war eine Kontrollvariante ohne Trocken- und Strahlungsstress. Hierfür wurden die Pflanzgefäße unter einem UV-undurchlässigen Foliendach (UV5, neue Eindeckung) aufgestellt. Ziel der zweiten Variante war die Charakterisierung von UV-Schäden. Für diese Variante standen die Pflanzgefäße unter einem UV-durchlässigen Foliendach (UV5, alte Eindeckung). Schwerpunkt der dritten Variante war die Prüfung des Einflusses von hoher Globalstrahlung auf Pflanzen. Hierzu wurden die Pflanzgefäße ungeschützt im Freiland aufgestellt. Alle Pflanzgefäße dieser drei Varianten wurden täglich gewogen und nach Unterschreitung des kritischen Wertes von 6,5 kg mit 2 l bewässert. Dadurch wurde sichergestellt, dass Trockenstressschäden weitgehend auszuschließen waren. Die Prüfung der Interaktion von Trocken- und Strahlungsstress, sowie die Erfassung von multiplen Stressreaktionen waren Ziele der vierten Variante, der Kombi-Stress Variante. Die Pflanzgefäße dieser Variante wurden ebenfalls ungeschützt im Freiland aufgestellt. Sie wurden zwar auch täglich gewogen, jedoch wurde keine Ausgleichbewässerung vorgenommen.

Tab. 4: Prüfvarianten zur Applikation von Strahlungsstress

Variante	Stressoren	Prüfstandort
1. Kontrolle	kein Stressor	UV-undurchlässiges Foliendach
2. UV-Stress	hohe UV-Strahlung	UV-durchlässiges Foliendach
3. Strahlungsstress	hohe Globalstrahlung	Freiland
4. Kombi-Stress	Trockenstress und hohe Globalstrahlung	Freiland

Zusätzlich variierte bei den vier Varianten die spektrale Zusammensetzung der Strahlung, der die Pflanzen ausgesetzt waren. Die Unterschiede verdeutlicht die Abb. 7 und die Tab. 5. Im Bereich der PAR unterschieden sich die Messergebnisse unter den eingesetzten Folien kaum voneinander. Gegenüber den Resultaten im Freiland ergab sich ein um 15 % geringerer Wert. Weitere Unterschiede lagen im UV-Bereich vor. Die geringste Strahlung wurde unter der UV-undurchlässigen Folie gemessen, gefolgt von der UV-durchlässigen Folie. Im Freiland war der höchste Anteil an UV-Strahlung zu verzeichnen. Strahlungsstressreaktionen unter der UV-durchlässigen Folie sind demnach auf Grund der gleichen PAR wie unter der UV-undurchlässigen Folie auf den höheren Anteil des UV-Gehaltes zurückzuführen.

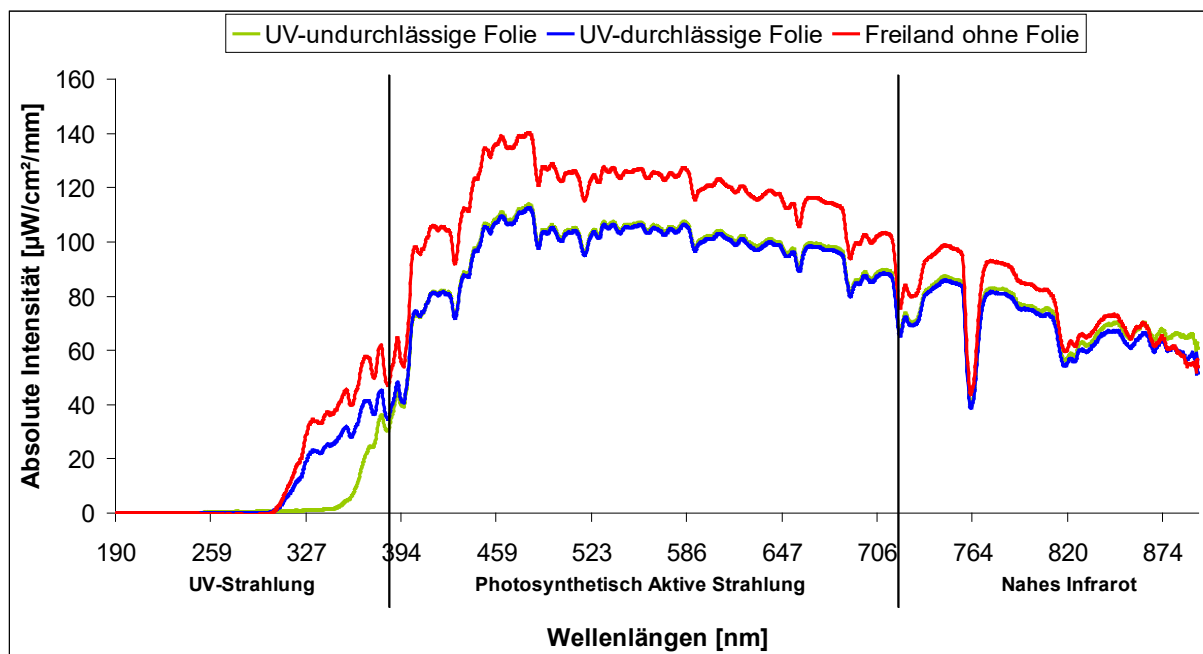


Abb. 7: Spektrale Zusammensetzung der Strahlung auf dem Prüfstand (absolute Intensität)

Tab. 5: Spektrale Zusammensetzung der Strahlung auf den Prüfstand ($\text{W/m}^2 \pm \text{SD}$)

	UV-B	UV-A	PAR	NIR
Wellenlängen	280-320 nm	320-380 nm	380-710 nm	710-890 nm
UV-undurchlässige Folie	0,26 ($\pm 0,01$)	5,20 ($\pm 0,18$)	313,76 ($\pm 6,48$)	131,65 ($\pm 3,42$)
UV-durchlässige Folie	0,90 ($\pm 0,4$)	17,21 ($\pm 0,4$)	311,27 ($\pm 3,5$)	127,31 ($\pm 6,8$)
Freiland ohne Folie	1,18 ($\pm 0,19$)	24,56 ($\pm 0,24$)	379,99 ($\pm 1,82$)	141,36 ($\pm 2,82$)

5.3.1.4 Erfassung der Stressbedingungen

Im Rahmen von Freilandexperimenten sind die herrschenden Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Stressapplikation von großer Bedeutung, um Rückschlüsse und Zusammenhänge zwischen den Pflanzenreaktionen und den Witterungsbedingungen ziehen zu können. Schwerpunkt war es, das Strahlungsangebot, das Lichtspektrum, die Temperatur und die Niederschlagsmenge zu erfassen.

Bei der Messung des Strahlungsangebotes während der Stressapplikation wurde UV-A, UV-B und PAR getrennt aufgezeichnet. Die Erfassung von UV-A- und UV-B-Strahlung erfolgte mit einer Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Standort Geisenheim in unmittelbarer Nähe des Prüfstandes. Für die Messung der PAR wurden LI-190 Quantum Sensoren mit dem Daterlogger LI-1400 der Firma LI-COR verwendet. Diese Sensoren zählen im Bereich von 400 bis 700 nm die Quanten der Photonen in $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$. Die Messung der spektralen Zusammensetzung der Strahlung im Bereich von 190 bis 890 nm erfolgte mit dem Spektralradiometer JAZ der Firma Ocean Optic. Auch der Faktor Lufttemperatur ist von großer Bedeutung. Vor allem das Zusammenspiel von hoher Einstrahlung und hoher Lufttemperatur könnte eine Schlüsselrolle in der Stressreaktion von Pflanzen spielen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich auch die Lufttemperatur und die Niederschlagsmenge aufgezeichnet. Dies geschah ebenfalls mit der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. Unter den eingesetzten Foliendächern wurden die Lufttemperatur mit Pt-100-Fühlern und die relative Luftfeuchte mit Feuchtefühlern gemessen und mit dem Testo 650 aufgezeichnet.

5.3.2 Kunstlichtprüfstand

Ein Kunstlichtprüfstand im Klimaraum hat gegenüber einem Freilandprüfstand den Vorteil, dass dieser unabhängig von wechselnden Witterungsbedingungen aufgebaut und überprüft werden kann. Die Herausforderung liegt jedoch darin, den Prüfstand so naturnah wie möglich zu gestalten, damit die Ergebnisse mit denen aus einem Freilandexperiment vergleichbar sind. Im Rahmen der Arbeit wurden Vorversuche mit zwei Halogenstrahlern des Typs 3170 der Firma Schuch durchgeführt. Die Strahlungsintensität oberhalb der Versuchspflanzen betrug $1200 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ PAR. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur auf konstante 22°C eingestellt. Die Regelungen weiterer Witterungsbedingungen, wie Windgeschwindigkeit, UV-Strahlung und relative Luftfeuchte, waren technisch nicht möglich. Im Verlauf von Vorversuchen zeigte sich, dass die Pflanzenreaktionen nicht mit denen im Freiland übereinstimmen (siehe Kapitel 6.1.2) und dass die bestrahlte Fläche von weniger als einen Quadratmeter zu klein war, um mit repräsentativer Stichprobengröße marktfähiger

Versuchspflanzen zu arbeiten (Abb. 8). Aus diesen Gründen wurde die Weiternutzung und Optimierung dieses Kunstlichtprüfstandes eingestellt.

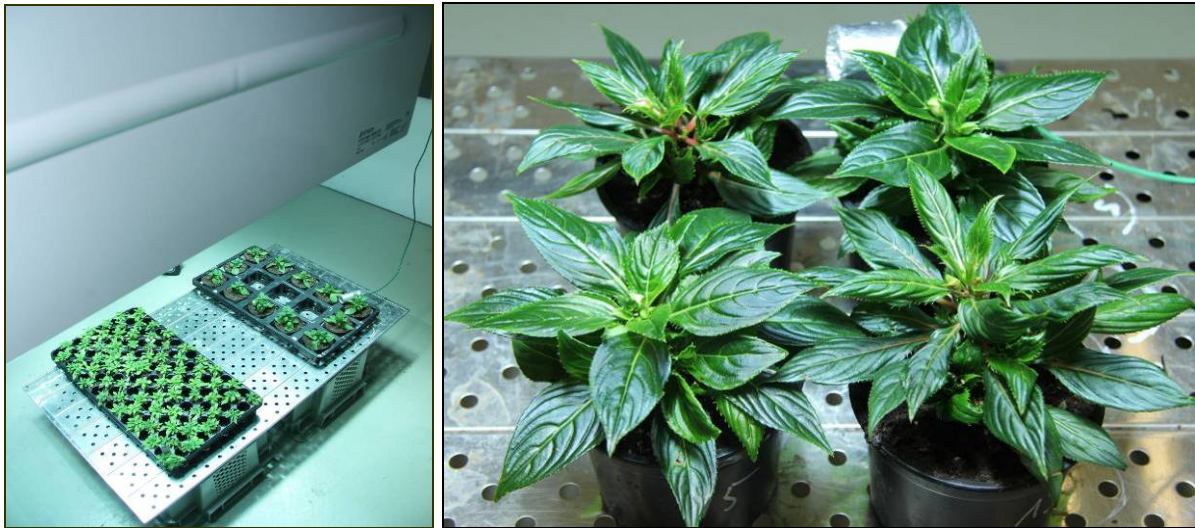


Abb. 8: Kunstlichtprüfstand mit zwei Halogenstrahlern testweise mit *Petunia*-Jungpflanzen (links) und mit 5 Wochen alten *Impatiens*-Genotypen (rechts)

5.4 Bonituren und Messungen von Pflanzenmerkmalen

5.4.1 Erfassung von Merkmalen nach der Anzucht

Nach LARCHER (2001) kann eine Anpassung von Pflanzen an Witterungsbedingungen sowohl modulativ, modifikativ als auch evolutiv erfolgen. Diese Anpassungen erfolgen auf der Ebene der reversiblen, irreversiblen und genetischen Anpassung und treten unter Bedingungen, die nicht den optimalen Bedingungen einer Pflanzenart entsprechen, ein. Im Rahmen der Arbeit fand eine Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot statt, um zum einen das Anpassungspotential der Genotypen zu charakterisieren und zum anderen den Einfluss der Einstrahlung während der Anzucht auf das Stressverhalten im Freiland zu studieren. Hierzu wurden nach der Anzucht der Versuchspflanzen morphologische, anatomische und physiologische Parameter erfasst. Diese quantitative Analyse der erworbenen Eigenschaften wird als Phänotypisierung bezeichnet (BMBF 2014). In der vorliegenden Arbeit wird die Phänotypisierung unter anderem für die Berechnung der phänotypischen Plastizität genutzt und um zu prüfen, welche dieser Merkmale als potenzielle Indikatoren der Strahlungsstresstoleranz in Frage kommen. Einen Überblick über die Merkmale zeigt die Tab. 6. Die eingesetzten Methoden zur Bestimmung dieser Merkmale werden im Folgenden näher erläutert.

Tab. 6: Merkmale und Methoden zur Erfassung der Stresstoleranz an *Impatiens Neuguinea*

Merkmal		Methode	Material
morphologisch	Stomatadichte	Entnahme der unteren Epidermis und Stomata zählen je mm ²	10 Pflanzen je Anzuchtvariante
	Schattenbildfläche	Schattenbildanalyse als Aufsicht	15 Pflanzen je Anzuchtvariante
	Kompaktheit	Quotient aus Anzahl der Triebe und Pflanzenhöhe	15 Pflanzen je Anzuchtvariante
	spezifische Blattfläche	Quotient aus Blattfläche und Trockengewicht	10 Blattscheiben je Anzuchtvariante
anatomisch	Blattdicke und Gewebeschichtdicke	histologisch mittels Lichtmikroskop	5 Blattstreifen je Anzuchtvariante
physiologisch	Photosyntheserate	Lichtsättigungskurve in Abhängigkeit des Lichtangebotes	1 Pflanze je Anzuchtvariante

5.4.1.1 Pflanzenmorphologische Merkmale

Pflanzenmorphologie bezeichnet die Forschung am Phänotyp und berücksichtigt die aktuelle Vielfalt der pflanzlichen Form (CLASSEN-BOCKHOFF 2001). Sie befasst sich somit im Wesentlichen mit der Lehre der Struktur und der Form von Organismen (SCHÖPKE 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Beschreibung der Pflanzenmorphologie die Merkmale Stomatadichte, Schattenbildfläche, Kompaktheit und spezifische Blattfläche berücksichtigt.

Erfassung der Stomatadichte

Nach LARCHER (2001) führt ein hohes Strahlungsangebot in der Anzucht bei vielen Pflanzen zu einer hohen Stomatadichte mit einer geringen Stomatagröße. Somit sind die Dichte und die Größe der Stomata weitgehend von dem Strahlungsangebot anhängig. Des Weiteren können Pflanzen mit einer hohen Stomatadichte schneller und besser auf Stresssituation reagieren, als Pflanzen mit einer geringeren Stomatadichte. Daraus ergibt sich folgende Arbeitshypothese: Strahlungsstresstolerante Genotypen weisen eine höhere Stomatadichte auf und können somit schneller auf Umweltänderungen reagieren als strahlungsstressempfindliche Genotypen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Stomatadichte der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach einer unschattierten und schattierten Anzucht erfasst. Dafür wurden von 10 Pflanzen ausgewachsene Blätter entnommen und mit einer feinen Pinzette ein Teil der unteren Epidermis entfernt. Da sich, anders als in Stomata, in der unteren Epidermis keine Chloroplasten befinden, können die Stomata dieses transparenten Gewebes mit einem

Lichtmikroskop und 10er Objektiv leicht erkannt und ausgezählt werden. Zur einfacheren Zählung wurde ein Objektiv mit Rasterangabe verwendet und die erfassten Daten auf einen Quadratmillimeter hochgerechnet.

Erfassung der Schattenbildfläche

Die Schattenbildfläche wird ebenfalls im hohen Maße von Witterungsbedingungen beeinflusst und ist ein Maß für das vegetative Wachstum von Pflanzen. Zudem informiert die Fläche einer Pflanze auch über die Angriffsfläche der Strahlung, da diese mit zunehmender Pflanzengröße zunimmt. Daher lautet die Alternativhypothese: Strahlungstresstolerante Genotypen weisen eine geringere Schattenbildfläche und somit weniger Angriffsfläche auf als strahlungsstressempfindliche Genotypen.

Hierzu wurde von 15 Pflanzen je Sorte und Anzuchtvariante mit einer Kamera die Pflanzengröße als Aufsicht aufgenommen. Mit Hilfe der Software WinDIAS 3 Colour Image Analysis System der Firma Delta-T Devices wurde anhand dieser Aufnahmen die Schattenbildfläche berechnet (Abb. 9). Diese anerkannte Methode ist unter dem Namen Schattenbildanalyse oder Blattflächenprojektion bekannt (MEYER et al. 2011).

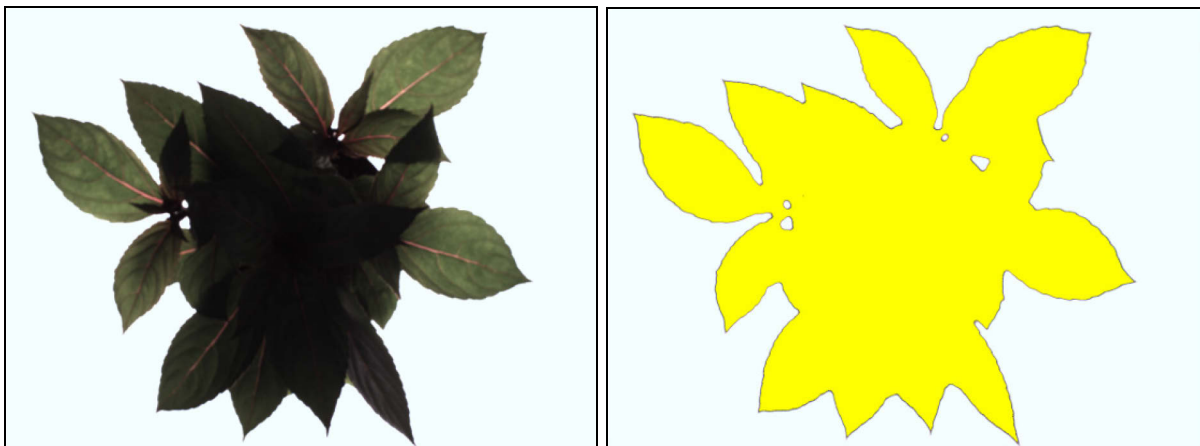


Abb. 9: Schattenbildanalyse zur Ermittlung der Pflanzengröße links vor und rechts nach der Bearbeitung mit der Software WinDIAS 3 Colour Image Analysis System

Erfassung der Pflanzenkompaktheit

Des Weiteren werden auch das Streckungswachstum und die Verzweigung von Zierpflanzen im hohen Maße durch Witterungsbedingungen, vor allem durch das Strahlungsangebot, beeinflusst (LUDOLPH 1995). In dieser Arbeit soll die Ermittlung der Kompaktheit einer Pflanze dazu beitragen, ihren Habitus genauer zu beschreiben. Grund dafür ist die

Annahme, dass bei kompakteren Pflanzen eine Art „Selbstbeschattung“ stattfindet. Dies führt zu folgender Alternativhypothese: Strahlungsstresstolerante Genotypen weisen einen kompakteren Habitus auf als strahlungsstressempfindliche Genotypen.

Hierzu wurden von 15 Pflanzen je Sorte und Anzuchtvariante alle Triebe, die in ihrer Länge größer als 3 cm waren erfasst, sowie die Pflanzenhöhe von der Substratoberfläche bis zur Meristemspitze gemessen. Der Quotient aus Anzahl der Triebe und Pflanzenhöhe wird in dieser Arbeit als Maß für die Kompaktheit der Pflanzen festgelegt. Bei der Interpretation der berechneten Daten ist zu beachten, dass ein hoher Wert eine Pflanze mit kompakterem Habitus beschreibt. Es ist umso wahrscheinlicher, dass sich Pflanzen mit einem kompakteren Habitus besser beschatten und somit eine höhere Strahlungsstresstoleranz aufweisen als Pflanzen mit einem weniger kompakten Habitus.

Erfassung der spezifischen Blattfläche (SLA)

Ein weiteres Pflanzenmerkmal, welches durch das Strahlungsangebot in der Anzucht stark beeinflusst wird, ist die Blattdicke (WEILER & NOVER 2008). Die Alternativhypothese lautet: Strahlungsstresstolerante Genotypen weisen dickere Blätter und somit eine niedrigere spezifische Blattfläche auf als strahlungsstressesensible Genotypen. Untermauert wird dies dadurch, dass Sonnenblätter dicker sind als Schattenblätter (RAHIM & FORDHAM 1991).

Die Bestimmung der Blattdicke ist mit mehreren Methoden möglich. Eine einfache und praktikable Methode ist die Bestimmung der spezifischen Blattfläche, die als Quotient aus Blattfläche und Trockengewicht definiert wird (WEIHER et al. 1999; WESTOBY 1998). Hierzu wurden von drei Pflanzen je Sorte und Anzuchtvariante Blätter entnommen. Mit einem Korkbohrer von 1 cm Durchmesser wurden 10 Blattscheiben je Pflanze ohne Hauptader ausgestanzt, gewogen und bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Bestimmung des Trockengewichtes folgte die Berechnung der spezifischen Blattfläche.

5.4.1.2 Pflanzenanatomische Merkmale

Die Pflanzenanatomie befasst sich mit der Anordnung des Gewebes im Pflanzenkörper (SCHÖPKE 2012) und beschränkt sich daher auf die innere Struktur und findet somit nur auf zellulärer Ebene statt (EVERT et al. 2009).

In der vorliegenden Arbeit werden Merkmale der Blattanatomie zur Charakterisierung der Versuchspflanzen genutzt. Es soll damit geprüft werden, ob diese mit der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens* korrelieren und sich somit als Merkmal für eine Früherkennung der Toleranz eignen. Hierzu erfolgte eine histologische Untersuchung durch

lichtmikroskopische Aufnahmen von Blattquerschnitten. Dafür wurden am Ende der Anzuchtphase des ersten Satzes in den Versuchsjahren 2012 und 2013 von repräsentativen Pflanzen Blattproben entnommen. Aus vorherigen Untersuchungen war bereits bekannt, dass Strahlungstressreaktionen nur an zur Sonne exponierten Blättern beobachtet werden. Auf Grund des sehr kompakten Wuchses einiger Genotypen wurde daher das Probenmaterial aus dem oberen Drittel des Blattes entnommen (Abb. 10). Diese Blattstreifen wurden anschließend im Labor mit einer Lösung aus Ethanol, Wasser, Formalin und Eisessig für 48 h fixiert (Tab. 7). Die Fixierung sorgt dafür, dass Zellwachstum und Zellentwicklung nicht weiter voranschreiten und der aktuelle Ist-Zustand des Blattgewebes bis zur weiteren Untersuchung beibehalten wird. Im nächsten Schritt wurden die Blattstreifen in Einbettkassetten überführt und infiltriert. Die Infiltration erfolgte in 10 Schritten unter Vakuum mit verschiedenen Medien (aufsteigende Alkoholreihe, zweimal Isopropanol, zweimal Ultra Clear und Ultra Clear + Parafin (Tab. 8)).

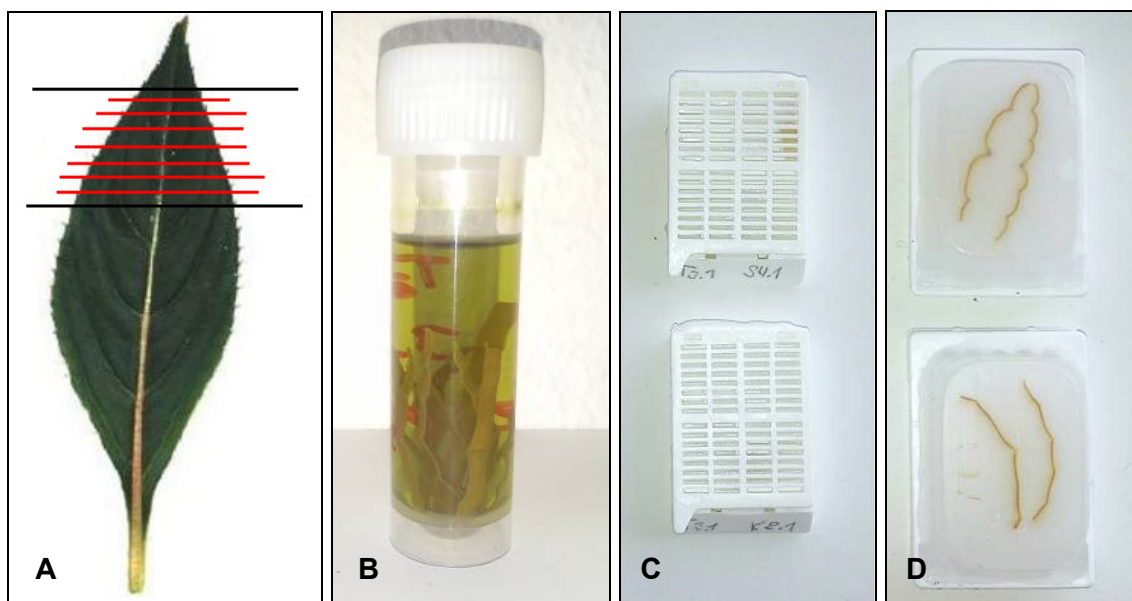


Abb. 10: Entnahme der Blattproben (A), Fixierung in PE-Röhrchen (B), Infiltration in speziellen Einbettkassetten (C) und Einbettung in Parafin (D)

Tab. 7: Rezept für 100 ml Fixierungslösung

Menge	Medium
70 ml	Alkohol (96 %)
20 ml	dest. Wasser
5 ml	Formalin (37 %)
5 ml	Eisessig

Tab. 8: Anleitung zur Infiltration der fixierten Blattproben

Station	Medium	Einwirkzeit	Vakuum / Temperatur
1	Alkohol 70 %	20 min	ja / --
2	Alkohol 80 %	20 min	ja / --
3	Alkohol 90 %	20 min	ja / --
4	Alkohol 96 %	20 min	ja / --
5	Alkohol 96 %	20 min	ja / --
6	Isopropanol 100 %	20 min	ja / --
7	Isopropanol 100 %	20 min	ja / --
8	Ultra Clear (Xylol-Ersatz)	20 min	ja / --
9	Ultra Clear (Xylol-Ersatz)	20 min	ja / --
10	Ultra Clear + Paraffin	40 min	ja / 58 °C
11	Paraffin	1,5 h	ja / 58 °C
Dauer		5 h 10 min	

Anschließend wurden die Proben mit Hilfe eines Paraffinspenders der Firma Leica hochkant in Einbettformen gestellt, mit dem Deckel der Einbettkassetten wieder abgedeckt und mit Paraffin übergossen (Abb. 10). Die Einbettkassetten besitzen runde Öffnungen für einen besseren Flüssigkeitsaustausch. Abgekühlt wurde dieser Paraffinblock mit Hilfe von Crushed-Ice bis der Block aushärtete und sich aus der Form löste. Nachdem die Paraffinblöcke ausreichend ausgehärtet waren, wurde mit einem Rotationsmikrotom 10 µm dünne Schnitte erstellt und in ein 40 °C warmes Wasserbad gelegt. Dies sorgt dafür, dass sich das Paraffin noch einmal glättet und die Schnitte nicht wellen. Anschließend wurden die Schnitte mit einem Objektträger aus dem Wasserbad entnommen und getrocknet. Anders als in vielen Lehrbüchern beschrieben (GERLACH 1984), zeigte sich aus eigenen Voruntersuchungen, dass die Färbung dieser Schnitte intensiver ist, wenn diese vorher nicht entparaffiniert werden. Daher erfolgte im Anschluss die Färbung mit W3A (Tab. 9) nach WACKER (2006) mit Ochsen-galle versetzt. Abschließend wurden die Proben mit Xylol-Ersatzstoff entparaffiniert und mit Sub-X der Firma Leica eingedeckt.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden mit dem BX 53 von Olympus durchgeführt. Durch eine integrierte Kamera wurden je Sorte und Anzuchtvariante 10 Aufnahmen erstellt (Abb. 11). Mit Hilfe der Software cellSens wurde an diesen Aufnahmen die Dicke der einzelnen Gewebeschichten und die des ganzen Blattes gemessen. Für eine statistisch gesicherte Aussage erfolgte dies an 10 Stellen je Aufnahme.

Tab. 9: Anleitung für die W3A-Färbung von Blattquerschnitten

Färbereagens und Herstellung	Einwirkzeit	Vorgang
Acridinrotlösung - 1000 ml Ethanol 50 % - 10 g Acridinrot - 20 ml Eisessig	10 min.	Färbung des Plasmas
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung
Acriflavinlösung - 1000 ml Aqua dest. - 10 g Acriflavin - 20 ml Eisessig	10 sek.	Färbung der Zellkerne
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung
Astrablaulösung - 1000 ml Aqua dest. - 10 g Astrablau - 20 ml Eisessig	2 min.	Färbung der Zellwände
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung
Aqua dest.	15 sek.	Auswaschung

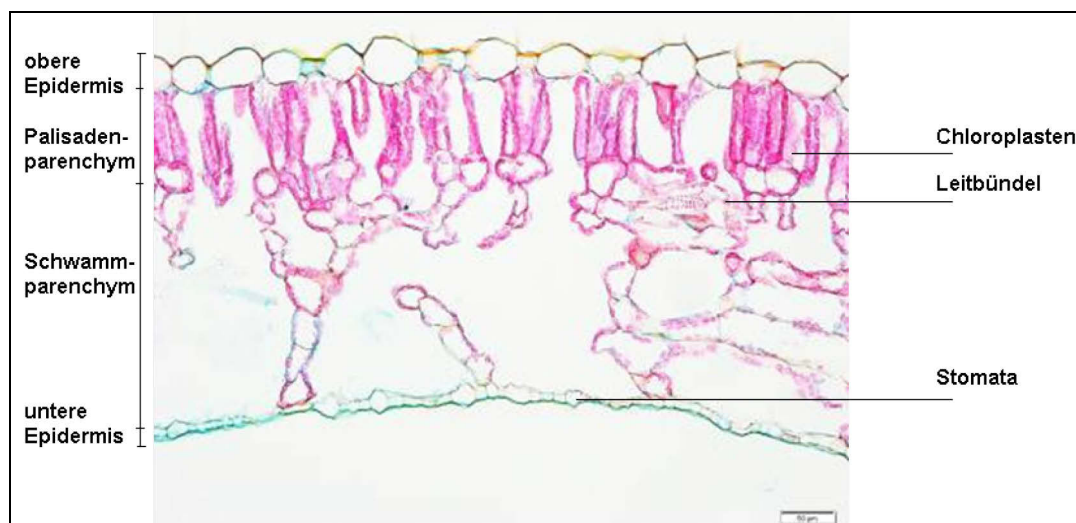


Abb. 11: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Blattquerschnittes von *Impatiens* der Sorte Imp 'Logia' mit einer W3A Färbung nach WACKER (2006) mit Ochsen-galle versetzt (Maßstab = 50 µm)

5.4.1.3 Pflanzenphysiologische Merkmale

Die Pflanzenphysiologie befasst sich mit den Lebensvorgängen einer Pflanze und beinhaltet die dynamischen Wachstumsprozesse, den Metabolismus, die Photosynthese und die Differenzierung von Organen (TAIZ & ZEIGER 2007). Als dritter Block wird in der vorliegenden

Arbeit die Pflanzenphysiologie an einem ausgewählten Merkmal, der lichtabhängigen Lichtsättigungskurve der Photosynthese, ermittelt. Begründet wird dies dadurch, dass mit Hilfe der Lichtsättigungskurve am Ende der Anzuchtphase physiologische Schatten- und Sonnenpflanzen bestimmt werden sollen. Damit soll das Anpassungspotential der Pflanzen charakterisiert werden, da Sonnenpflanzen (WEILER & NOVER 2008) und somit vermutlich auch strahlungsstresstolerante Genotypen, eine höhere Lichtsättigungskurve aufweisen, als strahlungsstressempfindliche Genotypen.

Für diese Versuchsreihe wurde das von der Firma WALZ entwickelte GFS-3000 Portable Gas Exchange Fluorescence System mit dem Standardkopf eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein offenes Messsystem mit einer Messküvette für ein Blatt pro Pflanze (Abb. 12). Das Messprinzip beruht auf der Tatsache, dass das eingespannte Blatt die Küvette mit H_2O anreichert und mit CO_2 abreichert (VON WILLERT et al. 1995). Die molare Durchflussrate von H_2O und CO_2 wird anschließend vom Messsystem erfasst. Der Gaswechsel eines Blattes ist jedoch neben der Belichtung auch von der Stomataweite und -anzahl abhängig. Dies bedeutet, dass je weiter die Stomata geöffnet sind und je mehr Stomata vorhanden sind, desto höher sind der Gaswechsel und die Photosyntheserate einer Pflanze.



Abb. 12: Messung des Gaswechsels für eine Lichtsättigungskurve von *Impatiens* mit dem GFS 3000 der Firma WALZ

Mit dem GFS 3000 sind Messungen des Gaswechsels und die Erstellung von Lichtsättigungskurven sehr zeitaufwändig. Sie sollten nur zwischen 8 und 12 Uhr morgens durchgeführt werden, da Pflanzen in eine Mittagsdepression geraten (TAY et al. 2007) und ab diesem Zeitpunkt die Messwerte nicht mehr vergleichbar sind. Die Stomataweite eines

Blattes wird nach LÖSCH (2001) jedoch nicht nur durch den Tageszeitpunkt beeinflusst, sondern auch durch Lichtangebot, Temperatur, Luftfeuchte und Wasserpotentialverhältnisse in der Pflanze, Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft, Blatttemperatur und interzellulärer CO₂-Konzentration. Diese Bedingungen wurden zu Beginn der Messung am Messgerät eingestellt und waren somit für alle Messungen gleich. Die Luftdurchflussrate betrug 750 µmol/s und die Geschwindigkeit des Ventilators stand auf Stufe 5. Eine konstante Raumluftzusammensetzung wurde durch einen 10 l-Mischbehälter gewährleistet. Des Weiteren wurde die Temperatur in der Küvette auf 22 °C und die Luftfeuchtigkeit auf 60 % eingestellt. Diese Einstellungen entsprachen den Werten, die im Gewächshaus während der Anzucht herrschten und somit den Bedingungen an die die Pflanzen adaptiert waren.

Für die Erstellung einer Lichtsättigungskurve der Photosyntheserate an der einzelnen Pflanze wurde eigens ein Messprogramm entwickelt, bei dem das Lichtangebot variiert und der aktuelle Gaswechsel gemessen wird. Für eine gleichmäßige Ausleuchtung wurde eine LED Lichtquelle (3040 L mit 90 % Rot- und 10 % Blau-Anteil) installiert. Die programmierten Lichtstufen waren 2000, 1500, 1000, 750, 500, 250, 100, 50 und 0 µmol/m²s und verliefen vom hohen zum niedrigerem Niveau. Nach jeder Umstellung zum niedrigeren Lichtniveau wurde das Messsystem eine Minute lang mit frischer Luft durchspült. Nach einem Intervall von drei Minuten im jeweiligen Lichtniveau wurde ein Messpunkt gesetzt. Vorversuche haben ergeben, dass sich *Impatiens* Neuguinea nach diesen drei Minuten an die Bedingungen angepasst haben und physiologisch konstanten Stoffwechsel zeigen. Für die Erstellung dieser Lichtsättigungskurve benötigt das entwickelte Programm 32 Minuten. Bei einem Messzeitraum von vier Stunden ist es somit nicht möglich, alle fünf Sorten aus beiden Anzuchtvarianten zu testen. Aus diesem Grund wurden nur die Sorten ImP 'Logia' der klassischen *Impatiens* und SunP 'Magenta' der SunPatians verwendet.

Der Auswertungsalgorithmus war im GSF 3000 fest vorinstalliert. Ein kleiner Bordcomputer erfasste somit nicht nur die Messdaten, sondern berechnete auch die Assimilationsraten. Dafür wurde folgende Formel verwendet:

$$A = \left(\frac{u_e * (c_e - c_o)}{LA} \right) - E * c_o \quad (1)$$

A steht für Assimilationsrate (µmol/m²s), u_e für Stoffmengendurchfluss am Eingang der Küvette (µmol/s), c_o für CO₂-Konzentration am Ausgang der Küvette (ppm), c_e für CO₂-Konzentration am Eingang der Küvette (ppm), LA für Blattfläche (cm²) und E für Transpirationsrate (mmol/m²s) (WALZ GMBH 2005).

5.4.1.4 Berechnung der phänotypischen Plastizität

Teilziel der vorliegenden Arbeit ist zum einen das Anpassungspotential der Genotypen zu charakterisieren, zum anderen den Einfluss der Einstrahlung während der Anzucht auf das Stressverhalten im Freiland zu studieren. Hierbei soll die phänotypische Plastizität als potentieller Indikator der Strahlungsstresstoleranz dienen. Phänotypische Plastizität eignet sich als Maß dafür, inwieweit ein Phänotyp von seinem Genotyp auf Grund von Umweltbedingungen abweicht (SCHMUTHS 2004). PIGLIUCCI (1999) definierte die phänotypische Plastizität als die Fähigkeit eines Genotyps, auf eine bestimmte Umweltbedingung mit verschiedenen Phänotypen zu reagieren. Daher wird angenommen, dass sich Genotypen schneller an Stressbedingungen anpassen können, je höher ihre phänotypische Plastizität liegt. Diese Plastizität lässt sich nach VALLADARES (2000) über den phenotypic plasticity index (PPI) bestimmen, welcher wie folgt berechnet wird:

$$PPI = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \quad (2)$$

P_{max} steht für den größten Mittelwert und P_{min} für den kleinsten Mittelwert des Parameters. Der daraus ermittelte PPI liegt zwischen 0 (keine Plastizität) und 1 (max. Plastizität). Zudem kann die mittlere phänotypische Plastizität (MPP) durch die Mittelung aus allen berechneten PPI ermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass Parameter mit unterschiedlichen Einheiten miteinander verglichen werden können (VALLADARES et al. 2000).

Im Rahmen der Arbeit wurde die phänotypische Plastizität für die morphologischen Eigenschaften Schattenbildfläche, Kompaktheit und spezifische Blattfläche und für die anatomischen Eigenschaft Blattdicke berechnet. Der Mittelwert dieser Indizes ergibt die mittlere phänotypische Plastizität.

5.4.2 Erfassung von Pflanzenparametern während der Stressapplikation

5.4.2.1 Morphologische Stressreaktionen

In eigenen Vorversuchen wurden während einer Strahlungsstressapplikation im Freiland zum einen weißlich-braune Aufhellungen der Blätter, zum anderen Welkeerscheinungen beobachtet. Dies sind ähnliche Symptome, wie sie auch in den Arbeiten von KRATO (2012) und TEVINI (1993) beobachtet wurden. Es stellte sich heraus, dass sich die Welke und auch die Aufhellungen klar voneinander trennen lassen und dass zudem für keines dieser Symptomgruppen eine pflanzenartspezifische Matrix existiert. Für beide Symptomgruppen wurden daher in dieser Arbeit Boniturschemata zur Charakterisierung der Intensität der Symptome entwickelt.

Bonitur von Blattnekrosen

Wie beschrieben wurde, sind ROS, die bei einer erhöhten Intensität von Strahlungsenergie gebildet werden, in der Lage Membranlipide zu zerstören (GRIMME 2006). Abb. 13 zeigt Reaktionen wie weißlich-braune Aufhellungen, die bei Voruntersuchungen nur an den zur Sonne exponierten Blättern auftraten. Diese Aufhellungen werden im Folgenden als Nekrosen bezeichnet, da es irreversible Schädigungen sind. Sie minderten je nach Intensität den Gesamteindruck der Pflanzen. Diese Minderung wurde in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe einer ordinalen Boniturskala von 1 (keine Symptome) bis 9 (ausgeprägte Symptome) nach Vorgabe des BUNDESSORTENAMTS (2000) erfasst und berücksichtigt den prozentualen Anteil von Nekrosen jeder Pflanze (Abb. 14 und Tab. 10). Die Bonitur erfolgte an allen auf dem Prüfstand befindlichen Pflanzen (Einzelpflanzenbonitur) und wurde in den frühen Morgenstunden durchgeführt, als die Blätter turgeszenter und die Nekrosen sichtbar waren.



Abb. 13: Detailansicht weißlich-brauner Aufhellungen an *Impatiens* Blättern

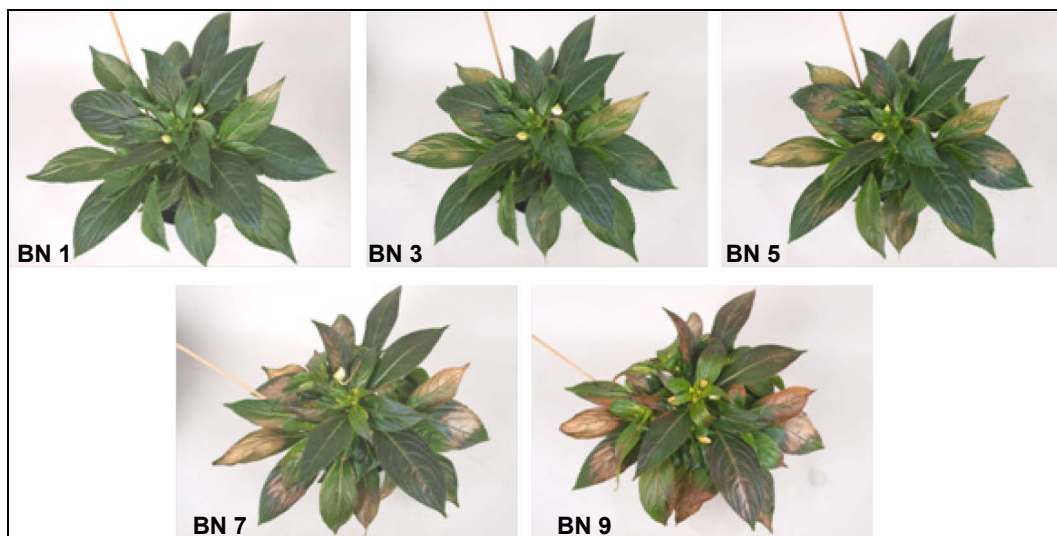


Abb. 14: Bildunterstütztes Boniturschema zur Erfassung von Nekrosen an *Impatiens*

Tab. 10: Boniturschema zur Erfassung von Nekrosen an *Impatiens*

Noten	Beschreibung
BN 1	keine Symptome
BN 3	5 % der Pflanzenfläche mit Nekrosen
BN 5	25 % der Pflanzenfläche mit Nekrosen
BN 7	50 % der Pflanzenfläche mit Nekrosen
BN 9	100 % der Pflanzenfläche mit Nekrosen

Bonitur von Welke

Neben den Nekrosen konnten zudem Welkeerscheinungen beobachtet werden. Welkeerscheinungen sind Reaktionen von Pflanzen, die unter Trockenstress leiden oder die auf Grund eingeschränkter Transpiration nicht mehr in der Lage sind, das vorhandene Bodenwasser aufzunehmen (BRUNOLD et al. 1996). Wie sich in Voruntersuchungen herausstellte, lassen sich Nekrosen durch Strahlungsstress gut von Welkeerscheinungen unterscheiden. Daher wurde auch hier eine Matrix zur Charakterisierung dieser Symptomgruppe angefertigt. Abb. 15 und Tab. 11 zeigen und beschreiben eine fortschreitende Intensität des Symptoms Welke, das mit Hilfe der ordinalen Boniturskala von 1 (keine Symptome) bis 9 (ausgeprägte Symptome) nach Vorgabe des BUNDESSORTENAMTS (2000) bonitiert wurde. Die Bonitur der Welkeerscheinungen erfolgte während der Stressapplikation bei allen Pflanzen auf allen Stressvarianten während des späten Nachmittages. Auch hier handelt es sich demnach um eine Einzelpflanzenbonitur.

Abb. 15: Bildunterstütztes Boniturschema zur Erfassung von Welke an *Impatiens*

Tab. 11: Boniturschema zur Erfassung von Welkeerscheinungen an *Impatiens*

Noten	Beschreibung
BN 1	keine Symptome
BN 3	erste Blätter beginnen zu welken
BN 5	überwiegender Teil der Pflanze welkt
BN 7	erste Blätter beginnen sich einzurollen
BN 9	überwiegender Teil der Pflanze mit eingerollten Blätter, die auf dem Topf aufliegen

5.4.2.2 Physiologische Stressreaktionen

Neben den morphologischen Stressreaktionen, wie Nekrosen und Welke, wurden zudem physiologische Stressreaktionen untersucht. Ziel war die Prüfung der Alternativhypothese, dass stresstolerante Genotypen unter Stressbedingungen eine höhere stomatäre Leitfähigkeit besitzen und somit einen besseren Wasser- und Wärmehaushalt und eine aktivere Photosynthese aufweisen. Um dies zu prüfen, wurden das GFS 3000 zur Messung des Gaswechsels, die Thermographie zur Bestimmung der Pflanzentemperatur und die MINI-PAM der Firma WALZ zur Bestimmung der Chlorophyll-Fluoreszenz eingesetzt.

Bestimmung der stomatären Leitfähigkeit mit dem GFS 3000

Die Messung der stomatären Leitfähigkeit gibt zerstörungsfrei Auskunft über den aktuellen Zustand einer Pflanze und informiert somit über eine aktuelle Stresssituation. Denn wie bereits bekannt ist, können Pflanzen sehr schnell auf Stresssituationen mit ihren Stomata reagieren. Je weiter die Stomata geschlossen sind, desto geringer sind die stomatäre Leitfähigkeit und damit auch die Photosyntheseleistung, die dann nicht mehr nahe dem Optimum ablaufen kann. Die stomatäre Leitfähigkeit, die von der Stomataweite und der Anzahl der Stomata abhängig ist (VON WILLERT et al. 1995), beschreibt somit auch indirekt die Aktivität der Photosyntheseleistung.

In der vorliegenden Arbeit wird die stomatäre Leitfähigkeit mit dem im Kapitel 5.4.1.3 beschriebenen Portable Gas Exchange Fluorescence System GFS-3000 der Firma WALZ durchgeführt. In 2012 und 2013 konnten die Messungen auf Grund der großen Anzahl an Versuchsgliedern und der kurzen Messzeit zwischen 8 und 12 Uhr nur bei einer Pflanze je Sorte und Anzuchtvariante und ohne biologische Messwiederholungen erfolgen. In 2014 wurde daher der Schwerpunkt auf die Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' gelegt. Es waren dadurch jeweils drei biologische Messwiederholungen möglich. In allen Versuchsjahren erfolgten die Messungen während der Stressapplikation im Freiland an einem ausgewachsenen Blatt. Vor Beginn der Messung wurde die Temperatur in der Küvette

auf 22 °C, die rel. Luftfeuchte auf 60 % und die CO₂-Konzentration der Atmosphäre angenommen. Das Lichtangebot wurde auf 1400 µmol/m²s eingestellt. Diese Bedingungen entsprachen den durchschnittlichen Bedingungen. Die Luftdurchflussrate betrug 750 µmol/s und die Geschwindigkeit des Ventilators stand auf Stufe 5 (Abb. 16).



Abb. 16: Messung der stomatären Leitfähigkeit von *Impatiens* mit dem GFS 3000

Ebenso wie die zuvor genannte Assimilationsrate wurde auch die stomatären Leitfähigkeit vom Bordcomputer des GFS 3000 berechnet. Demnach ist die stomatäre Leitfähigkeit (GH₂O) der Quotient aus E, der Transpirationsrate (mmol/m²s) und VPD, dem Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft (Pa/kPa). Also:

$$GH_2O = \frac{E}{VPD} \quad (3)$$

Für die Transpirationsrate und den Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft gilt:

$$E = \frac{u_e * (w_o - w_e)}{LA * (1 - w_o)} \quad (4)$$

$$VPD = \frac{w_i - w_a}{1 - \left(\frac{w_i + w_a}{2}\right)} \quad (5)$$

E steht für Transpirationsrate (mmol/m²s), u_e für Stoffmengenstrom am Eingang der Küvette (µmol/s), w_o für H₂O-Konzentration am Ausgang der Küvette (ppm), w_e für H₂O-Konzentration am Eingang der Küvette (ppm), LA für Blattfläche (cm²) sowie VPD für Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft (Pa/kPa), w_i für H₂O-Konzentration im Blatt (ppm) und w_a für H₂O-Konzentration in der Küvette (ppm) (WALZ GMBH 2005).

Bestimmung der Pflanzentemperatur mit der Thermographie

Hintergrund der Bestimmung der Pflanzentemperatur ist, dass sowohl Einstrahlung als auch Trockenstress die Pflanzentemperatur beeinflussen kann. Durch Wärmeabgabe über das Blatt in Form von Konvektion, wenn die Umgebungstemperatur kühler ist als die Pflanze, oder in Form von Evaporation können Pflanzen ihre Temperatur regulieren (TAIZ & ZEIGER 2007). Pflanzen sind somit in der Lage, durch das aktive Öffnen und Schließen der Stomata ihre Temperatur zu regeln (AYENEH et al. 2002). In der Praxis bedeutet dies, dass bei weit geöffneten Stomata, mehr Wasser transpiriert und dadurch die Pflanzentemperatur niedriger ist (JONES et al. 2009). Schließt eine Pflanze unter Wassermangel oder Überhitzung ihre Stomata, minimiert dies die Verdunstung an der Blattoberfläche, was zur Folge hat, dass die Pflanzentemperatur ansteigt und die Photosyntheserate, infolge des geringeren Austauschs von H₂O- und CO₂-Molekülen, abnimmt (IDSO et al. 1981; WEILER & NOVER 2008). Es ist somit möglich, mit Hilfe der Pflanzentemperatur Aussagen über die stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate zu machen. Da Pflanzen aber zu den wechselwarmen Organismen gehören, wird ihre Temperatur durch externe Faktoren beeinflusst (GATES 1980). Dazu zählen unter anderem die Wasserverfügbarkeit, die relative Luftfeuchte, die Umgebungstemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Sonneneinstrahlung (GATES 1980; JONES et al. 2009; LEINONEN & JONES 2004). Die Ermittlung der genauen Pflanzentemperatur wird durch diese Faktoren erschwert und gibt alleine keinen genauen Hinweis auf den Zustand der Pflanzen. IDSO et al. (1981) entwickelten daher einen Stressindex für Pflanzen, den sogenannten Crop Water Stress Index (CWSI):

$$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (6)$$

T_{canopy} steht für die Pflanzentemperatur, T_{dry} für die Temperatur einer trockenen Oberfläche und T_{wet} für die Temperatur einer feuchten Oberfläche. Die trockene Oberfläche repräsentiert eine Pflanze ohne Transpiration. Dafür wurde nach LEINONEN und JONES (2004) ein Blatt einer Referenzpflanze beidseitig mit Vaseline eingestrichen, damit es die Transpiration einstellt. Ein weiteres Blatt der Referenzpflanze wurde beidseitig mit Wasser eingesprüht und repräsentiert die feuchte Oberfläche einer Pflanze mit ausgeprägter Transpiration (LEINONEN & JONES 2004). In Thermalbildern sind diese Oberflächen dann als „Hot Spot“ und als „Cold Spot“ erkennbar. In früheren Studien wurde statt einer Referenzpflanze mit feuchten und trockenen Filterpapieren gearbeitet. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Oberflächenstruktur eine andere ist und somit die Energiebilanz nicht der einer Pflanze entspricht (JONES et al. 2009; JONES et al. 2002).

In der vorliegenden Arbeit wird die Thermographie genutzt, da es eine einfache, nicht-invasive Messmethode zur Bestimmung der Pflanzentemperatur ist. Verwendet wurde dafür die IR-Thermographiekamera Avio (NEC) Thermography H2640 mit 640×480 Bildpunkten der Firma NEC AVIO Infrared Technologies. Dabei handelt es sich um eine ungekühlte uFPA Infrarotkamera, die Thermalbilder und digitale Aufnahmen des Objektes erstellt. Die Erfassung der Oberflächentemperatur erfolgte während der natürlichen Stressapplikation. Es wurden dafür von jedem Pflanzgefäß Aufnahmen von drei der fünf Versuchspflanzen im Zentrum des Pflanzgefäßes erstellt. Die Kamera befand sich für diese Aufnahmen 120 cm über dem Objekt und erzeugte eine Aufsicht der Versuchspflanzen (Abb. 17). Für die abschließende Auswertung wurde die Software irMOTION collection verwendet und es wurde mit einem Emissionswert von 0,95 für pflanzliche Organismen gearbeitet (LEINONEN & JONES 2004). Zur Berechnung des CWSI nach LEINONEN und JONES (2004) wurde bei jeder Aufnahme eine Referenzpflanze mit aufgenommen. Bei dieser Pflanze wurde ein Blatt beidseitig mit Vaseline bestrichen und ein Blatt beidseitig mit Wasser eingesprüht (Abb. 17).

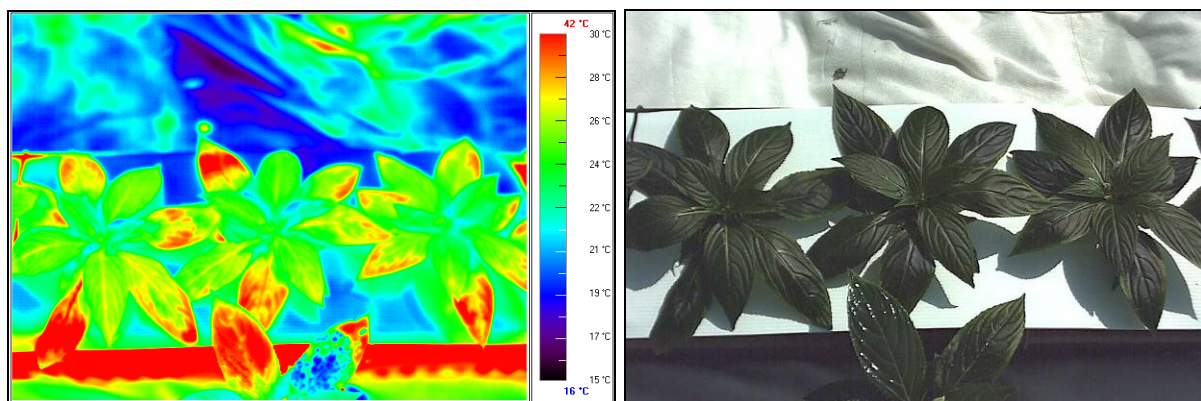


Abb. 17: Thermalbild (links) und visuelle Aufnahme (rechts) von *Impatiens* im Pflanzgefäß mit Referenzpflanze

Bestimmung der Chlorophyll-Fluoreszenz mit der MINI-PAM

Der letzte Block der physiologischen Untersuchungen der Versuchspflanzen während der Stressapplikation im Freiland ist die Bestimmung der Photosyntheseaktivität. Hintergrund dieser Untersuchungen ist, dass überschüssige Energie in Form von Wärme oder elektromagnetischer Strahlung (Fluoreszenz) abgegeben werden kann (GRIMME 2006). Ist eine Umweltbelastung zu hoch, läuft die maximale Quantenausbeute des PSII gehemmt ab. Die Chlorophyll-Fluoreszenz kann daher genutzt werden, um zerstörungsfrei die maximale Quantenausbeute des PSII zu messen. Diese wird aus dem Verhältnis der variablen Fluoreszenz (F_v) zu der maximalen Fluoreszenz (F_m) erfasst (ATANASOVA et al. 2003). Dabei weisen F_v/F_m -Indizes zwischen 0,76 und 0,83 auf gesunde, ungestresste Blätter hin. Werte

unter 0,76 hingegen auf ein Defekt des PSII und auf Photoinhibition (FINI et al. 2010b; PERCIVAL 2005).

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Messung der maximalen Quantenausbeute des PSII der Photosynthese Yield Analyser MINI-PAM von der Firma WALZ eingesetzt. Die Messungen erfolgten während der Stressapplikation jeweils nach einer 20minütigen Dunkelphase (HEIJARI et al. 2006). Als aktinisches Licht wurde $122 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ PAR eingesetzt. Jede Messrunde wurde mit einer dreifachen biologischen Messwiederholung durchgeführt. In Untersuchungen von GRIMME (2006) wird die Chlorophyll-Fluoreszenz zur Früherkennung von Pflanzenschäden durch Stress vor den ersten sichtbaren Symptomausprägungen genutzt. Als Anlehnung an diese Arbeit wurden die Messungen im Versuchsjahr 2014 vormittags vor Beginn der Stressapplikation und anschließend an den ersten drei Tagen während der Stressapplikation durchgeführt. Bedingt durch die Sortenanzahl, die Anzuchtvarianten und die Varianten in der Stressphase wurde auch hier der Schwerpunkt nur auf die Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' gelegt.



Abb. 18: Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz mit der MINI-PAM von WALZ an *Impatiens*

5.5 Statistische Auswertung

Die in der vorliegenden Arbeit gemessenen Daten wurden in Microsoft Excel erfasst und mit Hilfe der Statistiksoftware SigmaPlot und Statistica statistisch verrechnet. Bei metrischen Daten, die zugleich auch normalverteilt und varianzhomogen waren, wurde eine einfache (ANOVA) oder mehrfaktorielle (MANOVA) Varianzanalyse ($p < 0,05$) durchgeführt. Mit Tukey ($p < 0,05$) wurden signifikante Unterschiede zwischen Varianten ermittelt und mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet. Bei ordinalen Daten und Daten, die nicht normalverteilt oder varianzhomogen waren, wurde die parameterfreie Kruskal-Wallis ANOVA ($p < 0,05$) angewendet. Diese prüft analog zur ANOVA, ob signifikante Unterschiede zwischen Medianen bestehen. Signifikante Unterschiede zwischen Medianen wurden mit der Dunn's Methode erfasst und mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet.

Für die deskriptive Statistik wurden Boxplots und Balkendiagramme mit Microsoft Excel und SigmaPlot erstellt. Bei metrischen Daten wurde zudem die Standardabweichung eingezeichnet, um die reale Streubreite der erhobene Wert zu verdeutlichen. Bei ordinalen Daten, wie die Bonitur der Nekrosenintensität, wurden Balkendiagramme auf Basis des Medians erstellt. Aus den Boxplots ist nicht nur der Median der Daten zu entnehmen, sondern auch das 10. und 90. Perzentil, das 1. und 3. Quartil und Ausreißer.

Darüber hinaus wurde die Spearman Rangkorrelation angewendet, um Pflanzenmerkmale und Stressreaktionen in Beziehung zu setzen, da die anzuchtbedingten Merkmale metrisch und die Nekrosenintensität ordinal erfasst wurden.

6. Ergebnisse

Zur Untersuchung von Strahlungsstressreaktionen an *Impatiens*-Genotypen wurden in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 Vegetationsversuche durchgeführt. Ausgewählte morphologische, anatomische und physiologische Pflanzenmerkmale wurden vor und während einer Stressapplikation erhoben. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt und kurz diskutiert. Vorangestellt ist ein Unterkapitel, in dem die Entwicklung und Bewertung des hierfür verwendeten Prüfstandes kurz erläutert werden, da der Prüfstand ein wichtiges Teilergebnis der vorliegenden Arbeit ist.

6.1 Prüfstand zur Untersuchung von Strahlungsstressreaktionen

6.1.1 Gestaltung eines Freilandprüfstandes

Mit vier Varianten wurde ein Prüfstand zur Untersuchung der Strahlungsstressreaktionen im Freiland entwickelt. Als Variante 1 und Kontrolle diente ein Foliendach mit einer UV-undurchlässigen Folieneindeckung. Die Variante 2 befand sich unter einem Foliendach mit einer UV-durchlässigen Folieneindeckung und wird nachfolgend als UV-Stress bezeichnet. Die Durchlässigkeit des Folienmaterials ist aus Abb. 7 auf Seite 29 zu entnehmen. Variante 3 repräsentierte die Freilandvariante mit Strahlungsstress und Variante 4 war eine Kombination aus Freilandvariante mit Strahlungsstress (Variante 3) und Trockenstress (Abb. 19). Die Varianten 1 bis 3 wurden, im Gegensatz zu Variante 4, während der Stressapplikation ausreichend bewässert, um trockenstressbedingte Schäden weitgehend auszuschließen. Nach einer 10-wöchigen Anzuchtphase unter unterschiedlichem Strahlungsangebot wurden die Pflanzen in Gefäße gepflanzt und nach Ankündigung einer strahlungsreichen und niederschlagsarmen Phase auf die Varianten ausgestellt.



Abb. 19: Prüfstand zur Applikation von Strahlungsstress am Beispiel der Gattung *Impatiens*

6.1.1.1 Witterungsbedingungen während der Stressapplikation

Voraussetzung für Strahlungsstressversuche im Freiland ist eine warme, strahlungsreiche und regenarme Wetterlage. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zeigten, dass eine Spanne von vier bis sieben Tagen unter diesen Voraussetzungen als optimale Stressbedingungen einzustufen ist, um an strahlungsstressempfindlichen Genotypen die erwünschten Stresssymptome hervorrufen zu können.

Aus Abb. 20 geht die maximale Einstrahlung der PAR und die mittlere Tagestemperatur während der Stressapplikation im Freiland in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 hervor. Sowohl die Einstrahlung als auch die Temperatur weisen saisonal bedingte Schwankungen auf. Innerhalb der Versuchsjahre wurden die Untersuchungen im Freiland bei einer Einstrahlung zwischen $1.200 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ und $1.400 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ durchgeführt. In Einzelfällen lag das Maximum der Einstrahlung bei $800 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ und bei $1.600 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Die mittlere Tagestemperatur lag zum Zeitpunkt der Stressapplikation zwischen 15°C und 25°C . 2012 Satz 1 und 2013 Satz 1 zeigten im Vergleich die geringste mittlere Tagestemperatur, während 2013 Satz 2 die höchste mittlere Tagestemperatur vorwies. In 2012 Satz 1 waren es lediglich nur vier Tage mit der notwendigen optimalen Wetterlage, statt der erwarteten sieben Tage, wie in den anderen Sätzen. Dies reichte dennoch für eine erwünschte Symptomausprägung aus, obwohl die mittlere Tagestemperatur mit durchgehend knapp über 15°C unter den Erwartungen blieb.

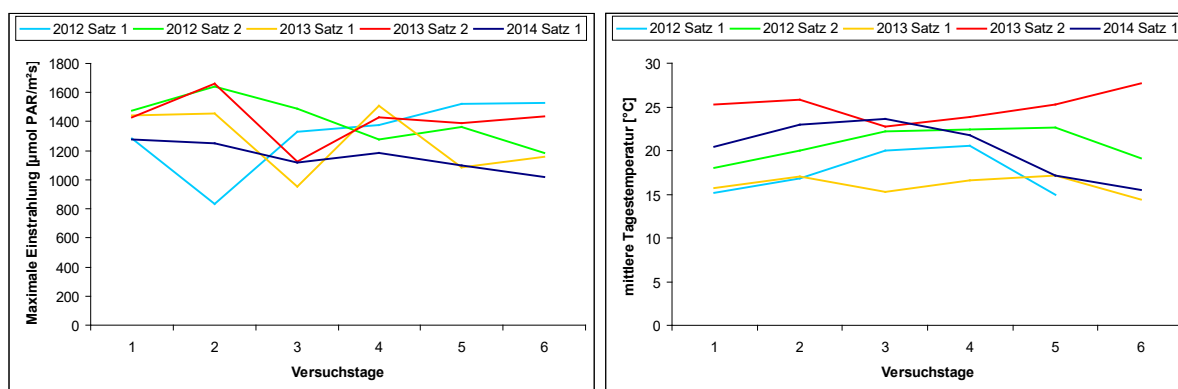


Abb. 20: Maximale Einstrahlung und mittlere Tagestemperatur an den ersten sechs Versuchstagen während der Stressapplikation im Freiland in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014

Um Temperatureffekte durch die in den Varianten 1 und 2 eingesetzten Folieneindeckungen berücksichtigen zu können, ist ein Temperaturverlauf unter diesen Bedingungen gegenüber dem Freiland für die spätere Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung. Abb. 21 zeigt den Temperaturverlauf aus den Versuchsjahren 2012 und 2013. Es sind deutliche und typische

Tag-Nacht-Schwankungen zu erkennen. Im Freiland stieg die Temperatur tagsüber auf fast 30 °C an und sank in der Nacht kaum unter 15 °C. Unter der Folieneindeckung stieg die Temperatur am Tag über die Temperatur im Freiland an und sank in der Nacht auf dasselbe Niveau herab. Die Unterschiede am Tag betrugen 10 K.

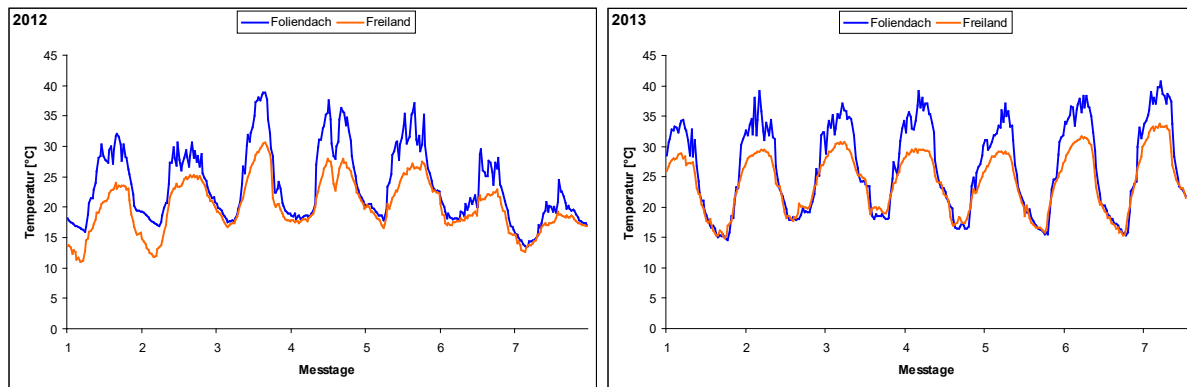


Abb. 21: Temperaturverlauf im Freiland und unter einem Foliendach in den Versuchsjahren 2012 und 2013

6.1.1.2 Kontrolle des Wasserangebotes

Wie bereits erläutert wurde, liegt laut BRUNOLD et al. (1996) die Vermutung nahe, dass die Strahlungstoleranz durch die Wasserversorgung der Pflanzen beeinflusst wird. Eine gesicherte Wasserversorgung der Versuchspflanzen unter Stressbedingungen ist daher von großer Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Regelung des Wasserangebotes gravimetrisch über eine Bestimmung des Systemgewichtes. Das Systemgewicht beinhaltete das Pflanzgefäß mit Substrat und Pflanzen. Eine Überwachung der Wasserversorgung mittels Tensiometer wurde getestet und wieder verworfen, da das Wasserpotential in der Variante Kombi-Stress soweit absank, dass sich die Tonkerze der Tensiometer vom Substrat löste und somit keine zuverlässige Langzeitermittlung des Wasserpotentials gewährleistet wurde. In Kurzzeitversuchen wurde jedoch nachgewiesen, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Systemgewicht vorhanden war (Abb. 22). Die gravimetrische Erfassung des Systemgewichtes wurde mittels einer Hängewaage ermittelt. Dies verringerte den Arbeitsaufwand gegenüber einer Wägung des kompletten Gefäßes. Untermuert wird dies durch die Abb. 22, die einen signifikanten Zusammenhang zwischen einer einseitigen Wägung mittels Hängewaage und einer beidseitigen Wägung des Pflanzgefäßes bestätigt.

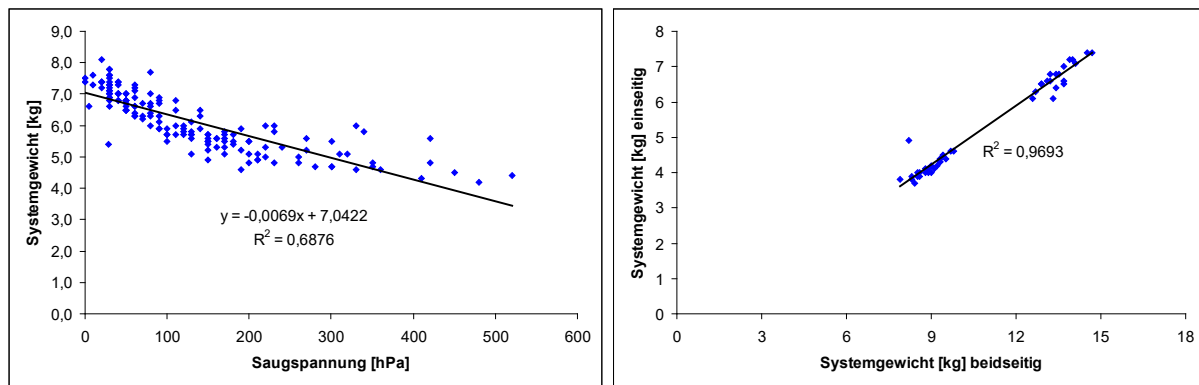


Abb. 22: Zusammenhang zwischen dem Systemgewicht und der Saugspannung (links) sowie zwischen einer einseitigen und beidseitigen Wägung der Pflanzgefäße (rechts)

Auf Grund dieser statistisch gesicherten Methode wurden alle Pflanzgefäße während der Stressapplikation täglich gewogen und nach Unterschreitung des Schwellenwertes von 6,5 kg mit 2 l Regenwasser gewässert. Abb. 23 zeigt die Systemgewichte der Pflanzgefäße in den Versuchsjahren 2012 und 2013 am Beispiel des jeweiligen ersten Satzes. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Gefäße der Varianten Kontrolle und Strahlungsstress, die eine gute Wasserversorgung erhalten sollten, während der Stressapplikation auf einem gleich hohen Niveau blieben. Das Gewicht der Pflanzgefäße der Variante Kombi-Stress sank hingegen signifikant unter das Niveau der gut bewässerten Varianten und verlief synchron zu einem parallel laufenden Trockenstressversuch. Auch in 2013 blieben die Gefäße der Varianten Kontrolle und Strahlungsstress auf einem gleich hohen Gewichtsniveau. Und das Gewicht der Variante Kombi-Stress sank auf ein geringeres Niveau ab.

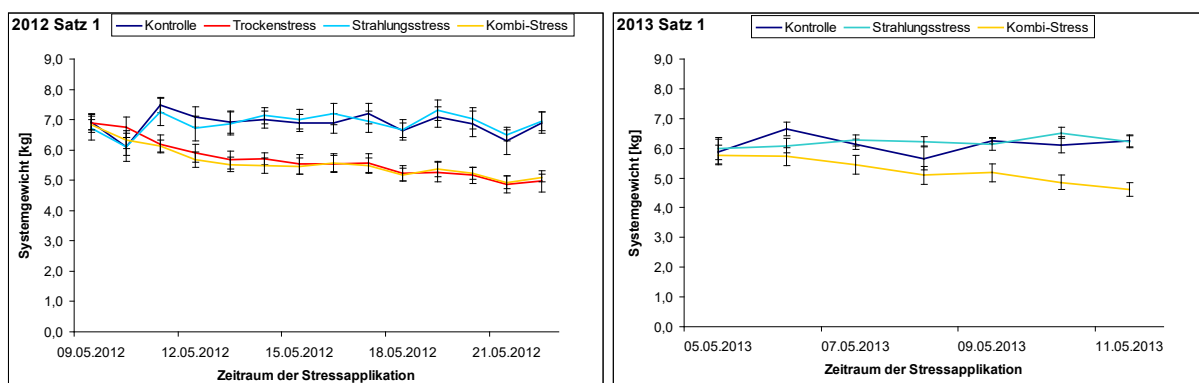


Abb. 23: Systemgewichte der Pflanzgefäße von *Impatiens* während der Stressapplikation

6.1.2 Ansätze zur Gestaltung eines Kunstlichtprüfstandes

Wie zuvor gezeigt wurde, unterliegen Pflanzen bei einem Prüfstand im Freiland stark den klimatischen Schwankungen. Die Durchführung dieser Versuche ist zudem sehr von dem Auftreten strahlungsreicher Phasen abhängig. Untersuchungen mit einem Prüfstand unter Kunstlichtbedingungen können hingegen wetterunabhängig durchgeführt werden. Die Gestaltung eines solchen Prüfstandes ist allerdings sehr komplex und mit hohem technischem Aufwand verbunden. Dazu zählen die Wahl des richtigen Leuchtentyps und die Simulation von Witterungsbedingungen. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Applikation von Strahlungstress Tastversuche mit *Impatiens* und einem Halogenstrahler des Typs 3170 der Firma Schuch durchgeführt. Dieser Typ enthielt in seinem Lichtspektrum sowohl Anteile von UV-A- als auch UV-B-Strahlung. Nachteil war, dass dieser auch einen hohen Anteil an Wärmestrahlung aufwies, was die Raumtemperatur stark beeinflusste. Dies führte zu einer ausgeprägten Abweichung von den natürlichen Bedingungen im Freiland (Tab. 12). Weitere, nicht berücksichtigte Parameter waren Windgeschwindigkeit und Ozonbelastung.

Tab. 12: Gegenüberstellung von Freiland- und Kunstlichtbedingungen mit Halogenstrahler

Parameter	Freiland	Kunstlichtraum mit Halogenstrahler
Strahlungsangebot	Fluktuierende Strahlung Max: 1.500 - 1.600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s PAR}$; Mittel: 300 - 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s PAR}$ UVA-Anteil: 13,5 W/m^2 UVB-Anteil: 1,2 W/m^2	Konstante Strahlung von 1.000 - 1.800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s PAR}$ UVA-Anteil: 71,02 W/m^2 UVB-Anteil: 0,071 W/m^2
Temperatur	Fluktuierend, mit sehr hohen Temperaturen (12 - 28 °C)	Konstante Temperaturen (25 - 30 °C)
Windgeschwindigkeit	Variiert zwischen 0 - 5 m/s	Konstant zwischen 0,2 - 0,5 m/s
sonstige Faktoren	Ozonbelastung	ohne Ozonbelastung

Die Problematiken einer Applikation mit Kunstlicht zeigen Tastversuche mit der Sorte ImP 'Moorea'. In der Abb. 24 ist die Sorte ImP 'Moorea' im Kunstlichtraum während einer Bestrahlung mit einem Halogenstrahler (links) und nach einem 6-tägigen Freilandaufenthalt (rechts) zu erkennen. Beide Pflanzen zeigten deutliche, aber unterschiedliche Reaktionen. Unter Kunstlichtbedingungen wurden Blätter mit Turgorverlust und leichten Einsenkungen des Blattgewebes im Bereich der Interkostalen beobachtet. Diese Schadsymptome deuten jedoch eher auf eine Plasmolyse durch Hitze hin, als auf hohe Strahlungsintensität. Die Pflanze aus der Freilandapplikation zeigte hingegen oberseitige Blattverbrennungen, die als Reaktionen auf Strahlungstress bekannt sind (WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013). Es waren

somit keine Symptomanalogien zwischen einer Strahlungsstressapplikation im Kunstlichtraum und einer im Freiland erkennbar. Da zudem auf Grund des geringen Abstandes von 50 cm zwischen Leuchte und Pflanze keine physiologischen Messungen durchgeführt werden konnten, fand keine Optimierung des Kunstlichtprüfstandes statt. Dies hätte lediglich dazu geführt, dass die Bestrahlung heterogen gewesen wäre und andere Leuchtmittel hätten erst getestet werden müssen. Weitere Untersuchungen fanden ausschließlich auf einem Freilandprüfstand statt.



Abb. 24: Reaktionen der Sorte Imp 'Moorea' unter Kunstlicht (links) und im Freiland (rechts)

6.1.3 Bewertung der Prüfstände

Kunstlichtprüfstände haben zwar den Vorteil, dass sie bei homogenem Pflanzenmaterial das ganze Jahr über eingesetzt werden können, jedoch wichen in der vorliegenden Arbeit die begleitenden Witterungsfaktoren zu stark von Freilandbedingungen ab. An der Sorte Imp 'Moorea' wurden daher Reaktionen ohne Symptomanalogien beobachtet. Weiterhin wurde deutlich, dass der Versuchsumfang stark durch die verfügbare Versuchsfläche eingeschränkt wurde. Dies ließe sich durch eine größere Anzahl der Leuchten verbessern, jedoch würde die Lichtverteilung auf der Fläche sehr heterogen werden. Hinzu kam, dass ein Freilandprüfstand unumgänglich für die Evaluierung der auf dem Kunstlichtprüfstand erzielten Ergebnisse ist. Diese Evaluierung muss durchgeführt werden, da nur so ein in Züchtungsarbeiten einsetzbares Screeningverfahren entwickelt werden kann, dass Rückschlüsse auf das Verhalten der Genotypen unter Freilandbedingungen charakterisiert. Angesichts dieser Tatsachen fand die Bearbeitung der vorangestellten Versuchsfragen ausschließlich auf einem Freilandprüfstand statt. Somit war es möglich, ein generelles Wissen über Strahlungsstressreaktionen an *Impatiens* Neuguinea zu erarbeiten.

6.2 Allgemeine Reaktionen von *Impatiens*-Genotypen auf Strahlungsstress

In den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 wurden insgesamt fünf Vegetationsversuche auf dem oben beschriebenen Freilandprüfstand durchgeführt. In allen Versuchen zeigte sich ein klares Symptombild. Nach nur wenigen Tagen konnten blattoberseitige Aufhellungen festgestellt werden. Meist von der Blattachse ausgehend überstreckten diese das ganze Blatt. Abb. 25 zeigt am Beispiel einiger *Impatiens*-Sorten das Schadbild. Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl ältere Blätter als auch jüngere Blätter diese Symptome zeigten. Hinzu kam, dass sowohl grün- als auch rotlaubige Blätter betroffen waren. Weiterhin wurde deutlich, dass sich die Färbung und die Form der Aufhellungen genotypisch unterschiedlich ausprägten. Die Sorte ImP 'Logia' wies hellbraune bis dunkelbraune Aufhellungen auf (Abb. 26). Die Sorte SunP 'Magenta' zeigte eher weißliche Aufhellungen (Abb. 27), von denen erst nur Punkte zu erkennen waren, die sich im Verlauf eines Tages großflächig über das Blatt erstreckten. Alle Symptome wurden jedoch nur an sonnenexponierten Blattbereichen beobachtet. An den Bereichen, an denen sich die Blätter überlappten, waren deutliche Abgrenzung zwischen gesunder und geschädigter Blattoberfläche zu erkennen (Abb. 25, unten rechts). Mit dieser Beschreibung des Schadbildes kann die eingangs erwähnte Versuchsfrage nach typischen Strahlungsstressschäden an Pflanzen der Gattung *Impatiens* Neuguinea als weißlich-braune irreversible Aufhellung (Nekrosen) beantwortet werden.



Abb. 25: Blattoberseitige Nekrosen an verschiedenen *Impatiens*-Sorten



Abb. 26: Reaktionen auf Strahlungsstress der *Impatiens*-Sorten 'Logia', 'Moorea' und 'Timor'

Abb. 26 und Abb. 27 zeigen die Pflanzen der Variante Strahlungsstress nach einer 7-tägigen Applikation im Freiland am Beispiel des Versuchsjahres 2014. Es sind deutliche Blattnekrosen an allen fünf Pflanzen je Pflanzgefäß zu erkennen. Zudem hatte sich bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Moorea' nach sieben Tagen eine oberseitige Nekrose zu einer beidseitig ausgeprägten Nekrose entwickelt. Hinzu kam eine deutliche Rotverfärbung des Laubes bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Timor', was auf eine Abwehrreaktion mit Anthocyanen hindeutet (Abb. 26). Auch bei den SunPatiens waren deutliche Nekrosen zu erkennen (Abb. 27). Damit unterschieden sich die eingangs als tolerant eingestuften SunPatiens in der Symptomausprägung visuell nicht von den klassischen *Impatiens*. Unterschiede waren lediglich im sehr starken Wuchs der SunPatiens zu erkennen.



Abb. 27: Reaktionen auf Strahlungsstress der SunPatiens-Sorten 'Magenta' und 'Orange'

6.3 Spezifische Reaktionen von *Impatiens*-Genotypen auf Strahlungsstress

In diesem Kapitel wird untersucht, wie verschiedene *Impatiens*-Genotypen auf hohe Strahlung reagieren. Hierzu wurden während einer Stressapplikation morphologische, anatomische und physiologische Pflanzenreaktionen erhoben. Zur Intensivierung der Symptomausprägung wurden die Pflanzen unter den in 5.2.2 beschriebenen schwachen Strahlungsbedingungen angezogen und den in 5.3.1.3 beschriebenen Stressbedingungen ausgesetzt.

6.3.1 Morphologische Reaktionen

Zur Erfassung morphologischer Stressreaktionen wurde in der vorliegenden Arbeit ein Boniturschema zur Beschreibung der Intensität von Welke und Nekrosen während der Stressapplikation herangezogen. Die Erhebung erfolgte täglich. Aus Abb. 28 und Abb. 29 gehen die Ergebnisse der Varianten Kontrolle, Strahlungsstress und Kombi-Stress sieben Tage nach Beginn der Stressapplikation hervor. In allen Sätzen ist zu erkennen, dass die Pflanzen in der Variante Kontrolle symptomfrei blieben. Die Pflanzen der Variante Strahlungsstress zeigten hingegen leichte bis mittel stark ausgeprägte Nekrosen. Bei der Variante Kombi-Stress wurde deutlich, dass die Nekrosen durch das Auftreten einer Welke nicht intensiviert wurden. Des Weiteren sind genotypische Unterschiede im Auftreten von Nekrosen zu erkennen. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

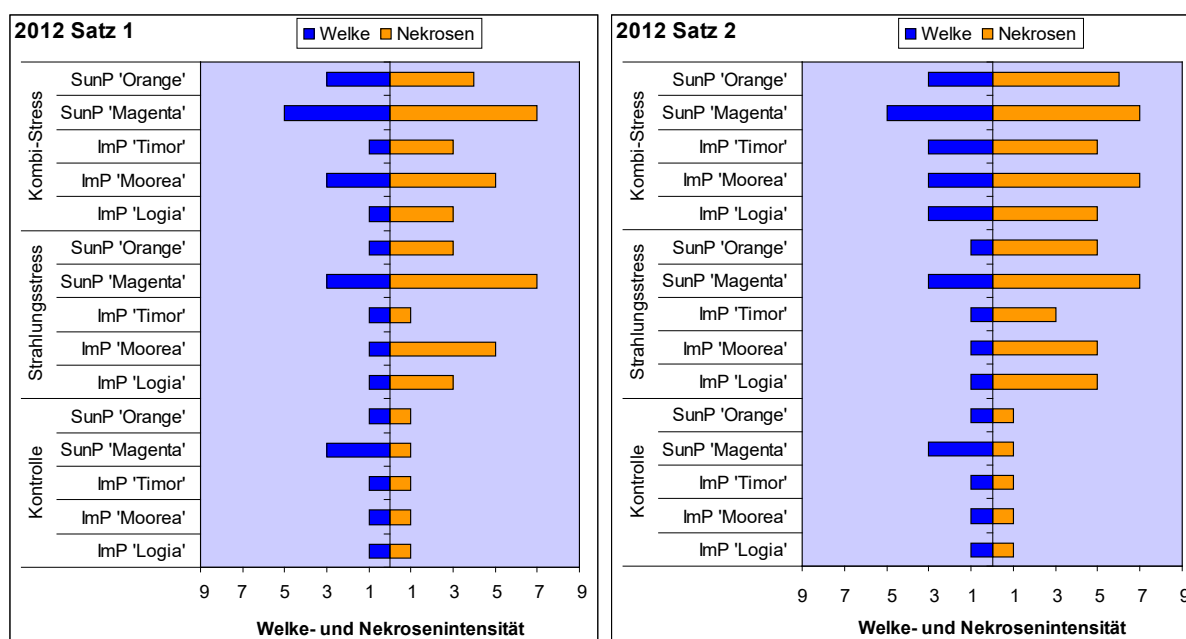


Abb. 28: Welke- und Nekrosenintensität von verschiedenen *Impatiens*-Sorten nach sieben Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2012

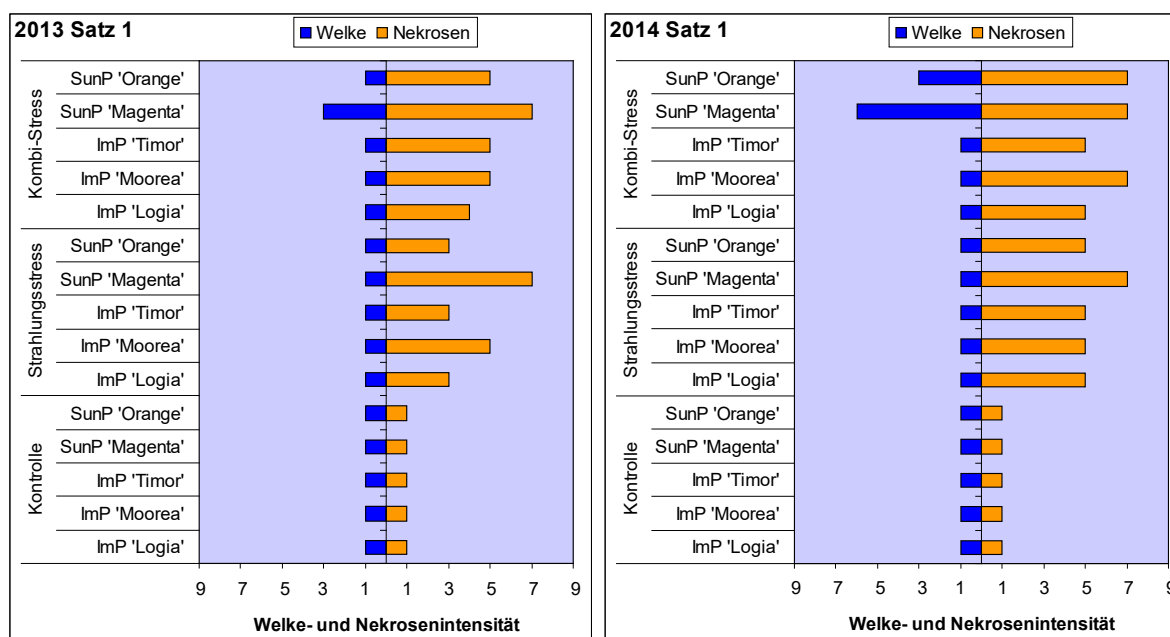


Abb. 29: Welke- und Nekrosenintensität von verschiedenen *Impatiens*-Sorten nach sieben Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2013 und 2014

Im ersten Satz des Versuchsjahrs 2012 überzeugte die Sorte ImP 'Timor' in der Variante Strahlungsstress, da diese Sorte im Gegensatz zu den anderen Sorten symptomfrei blieb. Die Sorte SunP 'Magenta' zeigte deutliche Schadsymptome bis Note 7. Auch in der Variante Kombi-Stress wurde die Sorte SunP 'Magenta' mit der Note 7 bewertet und zeigte auch hier mit Abstand die größte Schadintensität. Im zweiten Satz, in dem eine höhere Strahlungsintensität herrschte, ist die Differenzierung zwischen den Sorten nicht deutlich. Es ist jedoch zu erkennen, dass in der Variante Strahlungsstress die Sorte ImP 'Timor' als eher tolerant und die Sorten SunP 'Magenta' als eher empfindlich einzustufen ist.

Bei der in 2013 durchgeführten Wiederholung des Versuches ist bei der Variante Strahlungsstress wiederum eine gute Differenzierung zwischen den einzelnen Sorten zu erkennen. Bei den Sorten ImP 'Logia', ImP 'Timor' und SunP 'Orange' zeigte sich mit der Note 3 die geringste Schadintensität. ImP 'Moorea' wurde mit der Note 5 bewertet und SunP 'Magenta' zeigte mit der Note 7 erneut die größte Schadintensität. Auch in der Variante Kombi-Stress erwies sich die Sorte SunP 'Magenta', trotz der geringeren Welke, als sehr strahlungsstressempfindlich. Im zweiten Satz ist die Differenzierung zwischen den Sorten wieder nicht eindeutig. Aber auch hier zeigte sich, dass die Sorte SunP 'Magenta' in der Variante Strahlungsstress die größte Schadintensität aufwies. Zwischen den beiden Sätzen ist die Intensität der Welke sehr auffällig. Jedoch ist zu erkennen, dass das Auftreten von Nekrosen unabhängig vom Auftreten der Welke war (Anhang 1).

Im Versuchsjahr 2014 fand die letzte Wiederholung der Strahlungsstressapplikation an *Impatiens*-Genotypen unter Freilandbedingungen statt. Dieser Versuch bestätigt die zuvor

erfassten Sortenunterschiede. Ohne von Welke beeinträchtigt zu sein, wurde die Sorte SunP 'Magenta' mit der Note 7 bewertet. Trotz zusätzlichem Trockenstress wurden die Pflanzen in der Variante Kombi-Stress ähnlich beurteilt. Die Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Timor' wurden mit der Note 5 und die Sorten ImP 'Moorea', SunP 'Magenta' und SunP 'Orange' wurden mit der Note 7 bewertet.

Auf Grund dieser Datenbasis kann nun die Versuchsfrage, ob es im Sortiment der *Impatiens* strahlungsstresstolerante Genotypen gibt, bejaht werden, da die Sorte ImP 'Timor', trotz einzelner Nekrosen, als eher strahlungsstresstolerant und die Sorte SunP 'Magenta' als eher strahlungsstressempfindlich eingestuft werden kann.

Zur Klärung der Versuchsfrage, ob SunPatiens stresstoleranter sind als klassische *Impatiens*, erfolgt nun eine Gegenüberstellung dieser beiden Gruppen innerhalb der drei Varianten Kontrolle, Strahlungsstress und Kombi-Stress. Aus der Tab. 13 geht das Ergebnis dieser varianzanalytischen Untersuchung nach Kruskal-Wallis hervor. In der Variante Kontrolle lag zwischen den SunPatiens und den *Impatiens* kein signifikanter Unterschied vor. In der Variante Strahlungsstress lag in drei von fünf Sätzen ein signifikanter Unterschied vor. Dabei wurden die Pflanzen der SunPatiens signifikant höher geschädigt als die Pflanzen der klassischen *Impatiens*. In der Variante Kombi-Stress trat dies sogar in vier von fünf Sätzen auf. Dies bedeutet, dass in den ersten sieben Tagen des Transfers von einem geschützten Gewächshaus ins Freiland die SunPatiens signifikant empfindlicher reagierten als die klassischen *Impatiens*, womit auch die erste der eingangs beschriebenen Arbeitshypothesen abgelehnt werden muss.

Tab. 13: Prüfung der Nekrosenintensität als Median über die *Impatiens*-Sorten (signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$)

Versuchsjahr	Gruppe	Kombi-Stress	Strahlungsstress	Kontrolle
2012 Satz 1	SunPatiens	6 (a)	6 (a)	1 (a)
	<i>Impatiens</i>	3 (b)	3 (b)	1 (a)
2012 Satz 2	SunPatiens	7 (a)	6 (a)	1 (a)
	<i>Impatiens</i>	5 (b)	5 (b)	1 (a)
2013 Satz 1	SunPatiens	7 (a)	5 (a)	1 (a)
	<i>Impatiens</i>	5 (b)	3 (b)	1 (a)
2013 Satz 2	SunPatiens	7 (a)	7 (a)	1 (a)
	<i>Impatiens</i>	7 (b)	7 (a)	1 (a)
2014 Satz 1	SunPatiens	7 (a)	7 (a)	1 (a)
	<i>Impatiens</i>	7 (a)	5 (a)	1 (a)

6.3.2 Anatomische Reaktionen

In den Versuchsjahren 2012 und 2013 wurden, neben der Bewertung von morphologischen Merkmalen, auch anatomische Merkmale mit Hilfe von lichtmikroskopischen Aufnahmen der Blattquerschnitte untersucht. Dies diente dazu, Unterschiede in Gewebeschichten nach einer Strahlungsstressapplikation zu entdecken. Für diese Untersuchungen wurden speziell die Blattbereiche ausgewählt, die Nekrosen aufwiesen. Abb. 30 zeigt den Querschnitt eines gesunden Blattes im Vergleich zu Abb. 31, welches die lichtmikroskopischen Aufnahmen von nekrotischen Blättern verschiedenen *Impatiens*-Sorten zeigt. Es ist in Abb. 31 zu erkennen, dass an allen fünf Sorten das Schwammparenchym und die untere Epidermis unbeschädigt blieben. Das Palisadenparenchym wurde hingegen stark beeinträchtigt, so dass die palisadenartigen Zellen nicht mehr zu erkennen sind. Die Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' wiesen im Palisadenparenchym starke Deformierungen auf. Ebenso wurden bei allen Sorten die sonst gut sichtbaren Chloroplasten weitgehend zerstört. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Zellen der Epidermis bei den Sorten ImP 'Logia', ImP 'Timor' und SunP 'Orange' kollabierten. Bei den Sorten ImP 'Moorea' und SunP 'Magenta' waren vereinzelt Zellen der oberen Epidermis vorhanden. Dies lässt erkennen, dass oberseitige Nekrosen zuerst durch die Zerstörung der Chloroplasten und des Palisadenparenchym entstehen und anschließend die Epidermis beeinträchtigt wird. Grund für die Zerstörung der Chloroplasten könnte die erhöhte Bildung von ROS sein und wird im Verlauf der vorliegenden Arbeit noch diskutiert. Sortenspezifische Symptomausprägungen waren nicht festzustellen. Eine Schädigung der Zellschichten trat bei allen Sorten mit derselben Intensität auf.

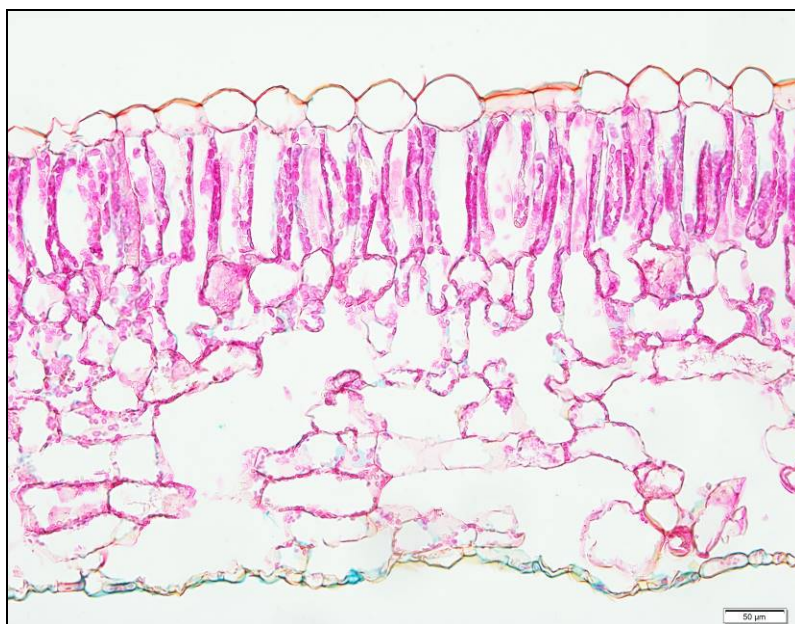


Abb. 30: Querschnitt eines gesunden Blattes der Sorte ImP 'Timor' (Maßstab = 50 µm)

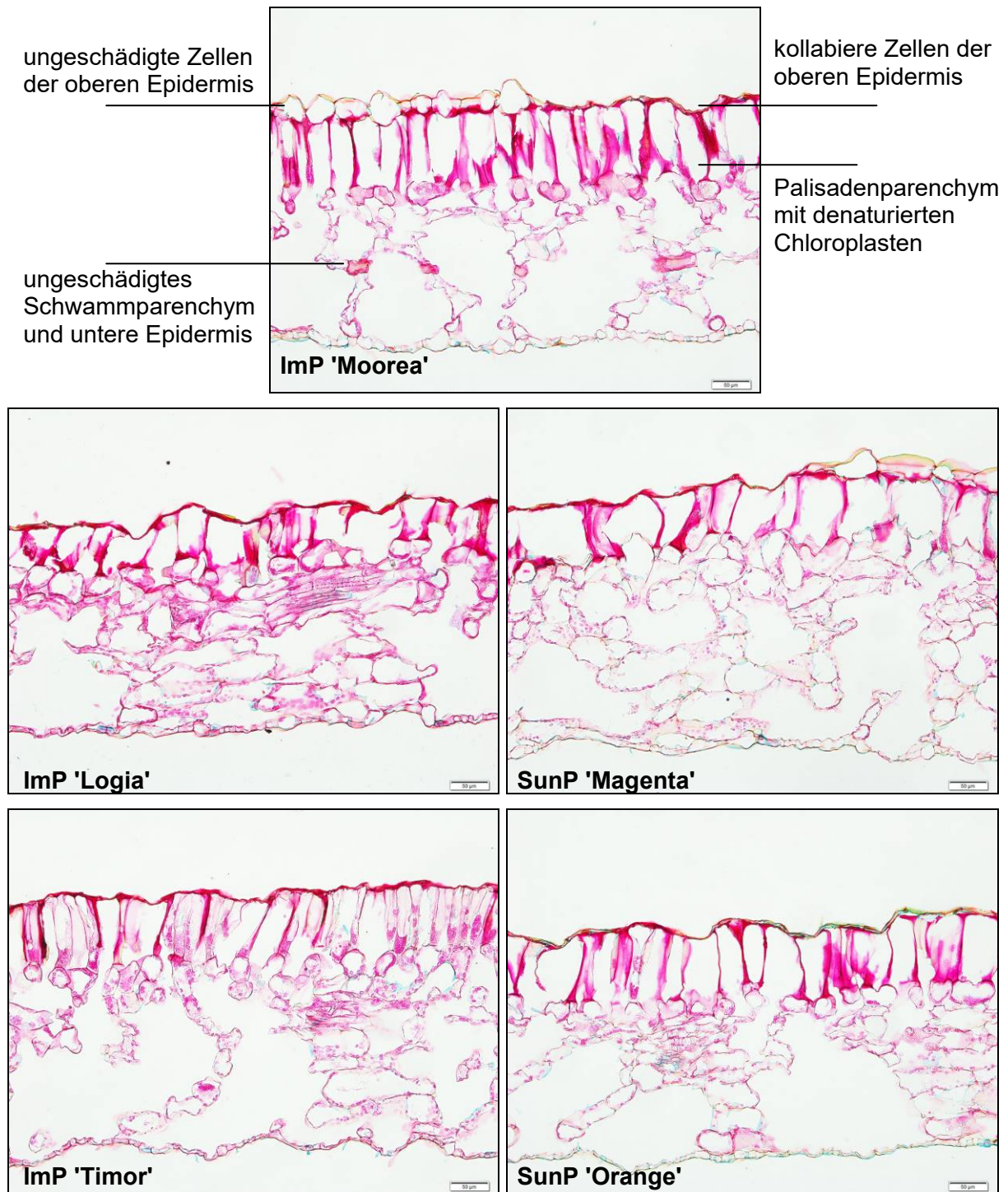


Abb. 31: Querschnitte von nekrotischen Blättern verschiedener *Impatiens*-Sorten nach sieben Tagen Strahlungsstressapplikation im Versuchsjahr 2014 (Maßstab = 50 µm)

6.3.3 Physiologische Reaktionen

Physiologische Reaktionen laufen den morphologischen Reaktionen voraus und haben somit das Potenzial als Frühindikator zu fungieren. Aus diesem Grund wurden während der Strahlungsstressapplikation physiologische Reaktionen auf Basis der stomatären

Leitfähigkeit, des Wärmehaushaltes und der Chlorophyll-Fluoreszenz erfasst. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt und kurz diskutiert.

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit einer Pflanze gilt als das Maß für die Weite ihrer Stomata. Dies basiert auf der Tatsache, dass eine Verringerung der Stomataweite zu einer Reduzierung der Transpirations- und Photosyntheseleistung führt, was sich wiederum in einer geringen stomatären Leitfähigkeit widerspiegelt.

Im Versuchsjahr 2012 wurde aus technischen Gründen sechs Tage nach Beginn der Strahlungsstressapplikation die stomatäre Leitfähigkeit gemessen. Um alle Sorten in den Varianten Strahlungsstress und Kombi-Stress innerhalb eines Messzyklus untersuchen zu können, wurde jeweils nur ein Blatt einer Pflanze je Sorte verwendet. Der Abb. 32 ist zu entnehmen, dass die stomatäre Leitfähigkeit in der Variante Kombi-Stress signifikant niedriger lag, als in der Variante Strahlungsstress. Somit waren die Stomata in der Variante Kombi-Stress signifikant geschlossener, als in der Variante Strahlungsstress. Ein Unterschied zwischen den klassischen *Impatiens* und den SunPatens lag nicht vor.

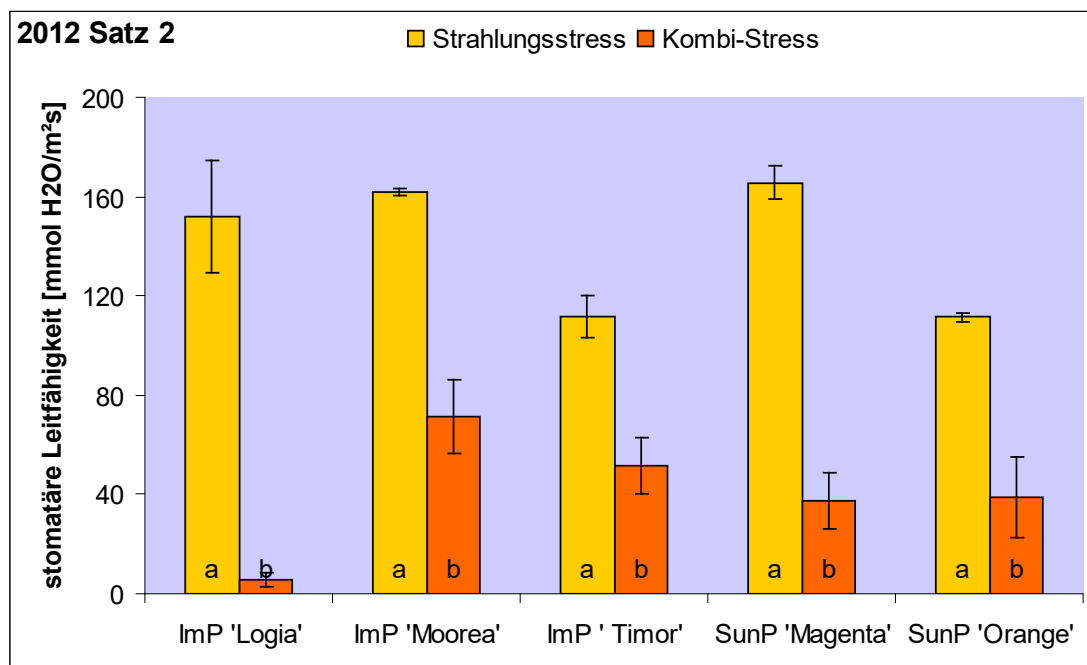


Abb. 32: Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Strahlungsstress und Kombi-Stress sechs Tage nach Stressbeginn (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$)

Im Versuchsjahr 2013 wurde die stomatäre Leitfähigkeit bereits am zweiten Tag nach Beginn der Stressapplikation gemessen. In diesem Versuch wurden neben den Pflanzen der Variante Strahlungstress und Kombi-Stress auch die Pflanzen aus der Variante Kontrolle berücksichtigt. Abb. 33 zeigt, dass die stomatäre Leitfähigkeit bei allen Sorten und in allen Varianten auf einem sehr niedrigen Niveau war. Diese weist darauf hin, dass die Stomata aller Pflanzen fast vollständig geschlossen waren. Trotzdem weist die Statistik signifikante Unterschiede auf. Die Pflanze der Variante Kontrolle zeigte bei den Sorten ImP 'Moorea', SunP 'Magenta' und SunP 'Orange' eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit auf, als in den anderen beiden Varianten. Die Sorte ImP 'Timor' zeigte in den Varianten Kontrolle und Kombi-Stress die signifikant höchsten Werte. Hinzu kommt, dass die SunPatiens in den Stressvarianten eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit aufwiesen, als die Pflanzen der klassischen *Impatiens*. Die im Versuchsjahr 2012 beobachteten systematischen Unterschiede zwischen den Varianten Strahlungstress und Kombi-Stress sind allerdings nicht zu erkennen.

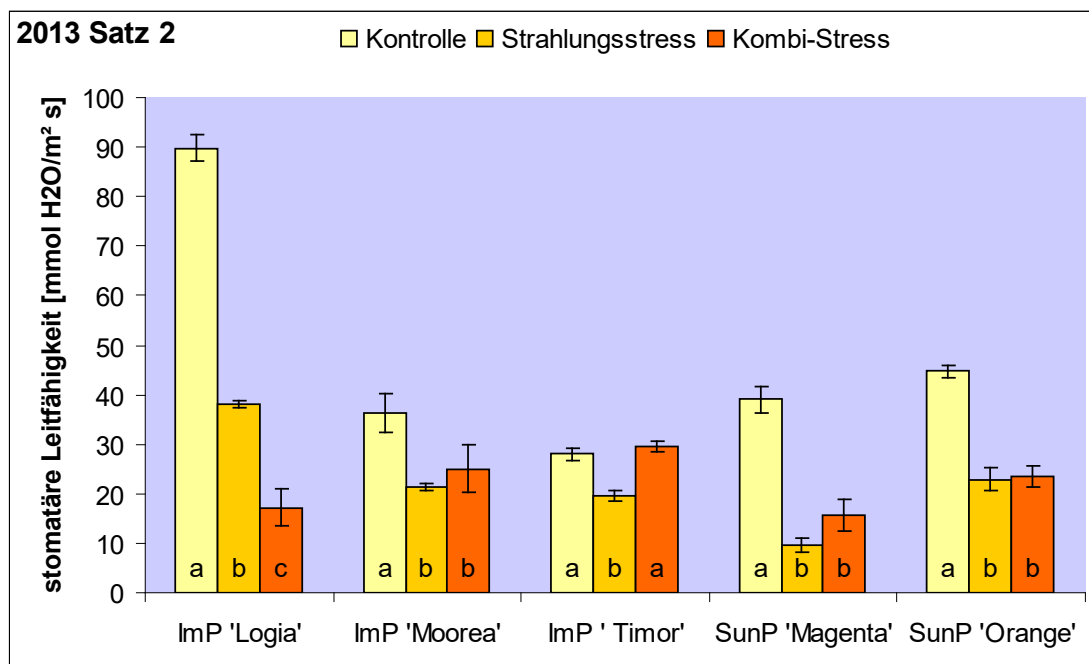


Abb. 33: Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Kontrolle, Strahlungstress und Kombi-Stress zwei Tage nach Stressbeginn (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$)

Ein Vergleich der beiden Versuchsjahre zeigt ausgeprägte Unterschiede. Es lag zwar kein Unterschied in der Messtechnik vor, jedoch bestand ein gravierender Unterschied im Messzeitpunkt. Um den Einfluss des Messzeitpunktes zu studieren, wurden im Versuchsjahr

2014 die Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Eine Startmessung erfolgte noch im Gewächshaus (GWH) kurz vor dem Transfer ins Freiland. Anschließend wurden 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation die Messungen im Freiland an denselben Blättern wiederholt. Zudem lag im Versuchsjahr 2014 der Schwerpunkt der Messungen bei den Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta'. Dadurch war es möglich, mit drei biologischen Messwiederholungen je Sorte und Variante zu arbeiten.

Aus der Abb. 34 geht hervor, dass die Sorte ImP 'Logia' einen weit niedrigeren Ausgangswert hatte, als die Sorte SunP 'Magenta'. Zudem ist zu erkennen, dass nach 24 h Stressapplikation die Werte signifikant unter den Ausgangswert sanken und im weiteren Verlauf wieder anstiegen. Gestützt an das Modell der Stressphase nach LARCHER (2001) lassen sich diese Messergebnisse in Alarmphase, Restitutionsphase und Phase der Abhärtung gliedern. Auffallend ist weiterhin, dass die Pflanzen der Variante Kontrolle ausgeprägter reagierten als die Pflanzen der Variante Strahlungsstress. Grund für diesen Effekt könnten die vorangestellten Witterungsdaten liefern, da sich unter dem Foliendach eine höhere Temperatur entwickelte. Ein Einfluss der höheren Temperaturen auf die Weite der Stomata ist daher nicht auszuschließen und wird im Folgenden näher erörtert. Zusammenfassend ist aus diesem Versuch abzuleiten, dass der Zeitpunkt für die Messung der stomatären Leitfähigkeit entscheidend für die Interpretation der Daten ist.

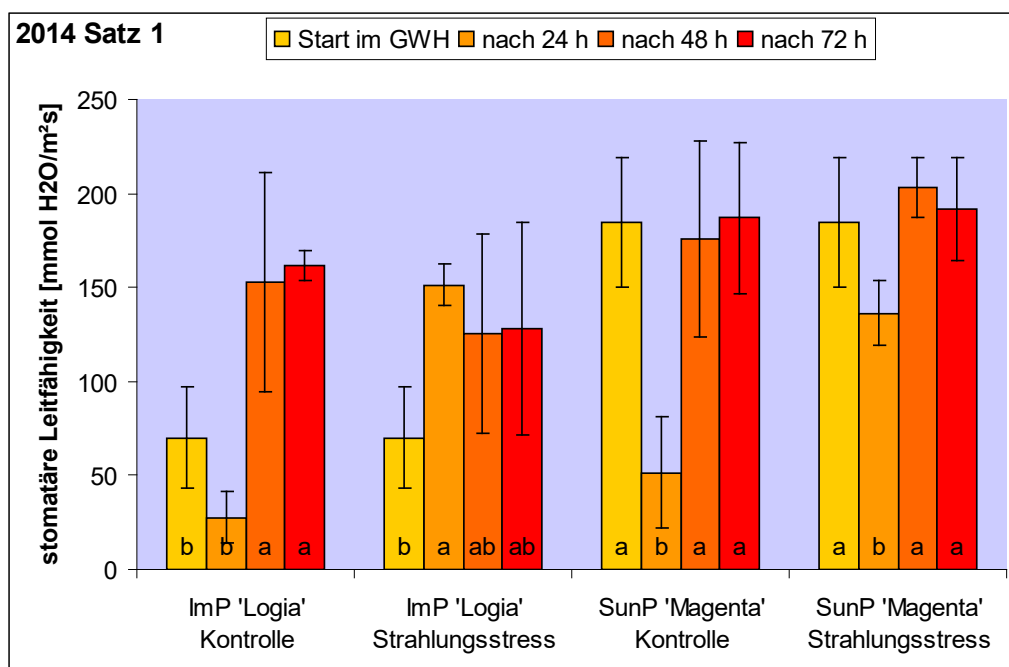


Abb. 34: Stomatäre Leitfähigkeit der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und Strahlungsstress in den ersten vier Tagen der Stressapplikation (signifikante Unterschiede zwischen den Tagen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 9$)

Wärme- und Wasserhaushalt

Für die Bestimmung des Wärme- und Wasserhaushaltes einer Pflanze wurde in der vorliegenden Arbeit die Pflanzentemperatur mit Hilfe der Thermographie erfasst und in Thermalbildern abgebildet. Zur quantitativen Bewertung der Stresssituation wurde anschließend die Berechnung des Crop Water Stress Index (CWSI) nach LEINONEN und JONES (2004) auf der Basis der Pflanzentemperatur durchgeführt.

Zur Verdeutlichung des Prinzips des CWSI erfolgte im Versuchsjahr 2012 Satz 2 ein Austrocknungsversuch mit Pflanzgefäßen unter einem UV-undurchlässigen Foliendach, die nachfolgend entweder bedarfsgerecht bewässert (Variante Kontrolle) oder nicht bewässert wurden (Variante Trockenstress). Abb. 35 zeigt den CWSI der beiden Varianten. Über alle Sorten betrachtet, lag in der Variante Kontrolle der CWSI signifikant unter dem Niveau der Variante Trockenstress. Dies bedeutet, dass die Pflanzentemperatur in der Variante Trockenstress signifikant höher war und somit die Stomata geschlossener waren als bei den Pflanzen in der Variante Kontrolle. Ein Unterschied zwischen den Sorten lag nicht vor.

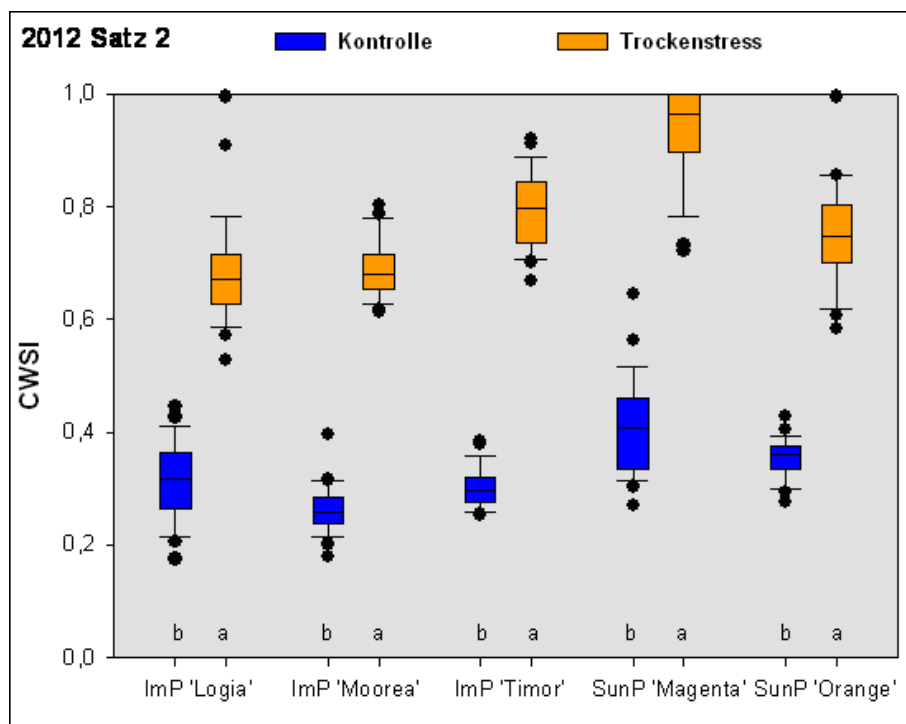


Abb. 35: CWSI verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Kontrolle und Trockenstress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)

Ein wesentliches Ziel war jedoch die Prüfung, ob Strahlungstresstoleranz mit Hilfe des CWSI beschrieben werden kann. Dafür wurde drei Tage nach Beginn der Stressapplikation

die Pflanzentemperatur aller Pflanzen der Variante Kontrolle und Strahlungsstress erfasst. Die daraus ermittelten CWSI zeigt die Abb. 36. Es geht daraus hervor, dass im Versuchsjahr 2012 der CWSI auf einem allgemein niedrigen Niveau lag. Unterschiede zwischen den Varianten waren gering und nur bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Timor' signifikant. Im Versuchsjahr 2013 Satz 1 lagen die Werte allgemein höher und bei allen Sorten, mit Ausnahme der Sorte ImP 'Logia', sind deutliche Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen. In Satz 2 lagen die Werte auf einem ähnlichen Niveau wie in Satz 1 und zeigten diesmal bei allen Sorten signifikante Unterschiede. Im Versuchsjahr 2014 ist wiederum kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Auffällig ist zudem, dass in diesem Versuchsjahr die Sorte SunP 'Magenta' in der Variante Kontrolle ein signifikant höheres Niveau aufwies, als in der Variante Strahlungsstress. Ein Zusammenhang mit der eingangs erwähnten höheren Lufttemperatur unter dem eingesetzten Foliendach ist nicht auszuschließen und beeinträchtigt die Bewertung der Thermographie als Frühindikator für Strahlungsstress.

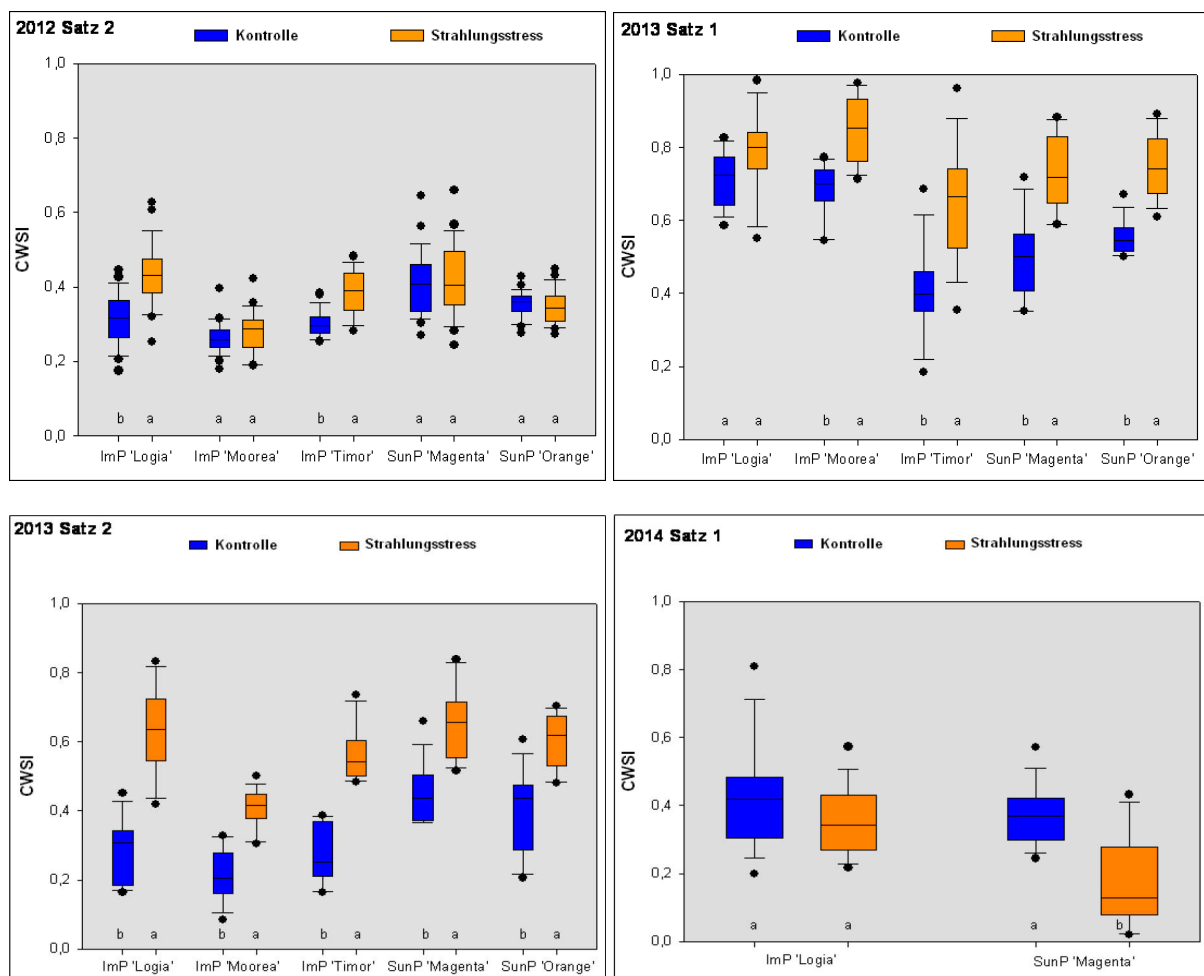


Abb. 36: CWSI verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Kontrolle und Strahlungsstress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)

Chlorophyll-Fluoreszenz

Die Chlorophyll-Fluoreszenz ist in der pflanzenphysiologischen Forschung ein häufig eingesetzter Indikator, um eine Beeinträchtigung des PSII durch Stress zu quantifizieren. Ein F_v/F_m -Index unter 0,76 weist demnach auf eine Beeinträchtigung des PSII und somit auf Photoinhibition hin (FINI et al. 2010a; PERCIVAL 2005). In der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode angewandt, um zu prüfen, ob sich die Chlorophyll-Fluoreszenz zur Identifizierung der Strahlungsstresstoleranz eignet.

Die Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz wurde im Versuchsjahr 2014 bei den Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' in den Varianten Kontrolle und Strahlungsstress eingesetzt. Aus der Abb. 37 gehen die gemessenen F_v/F_m -Indizes zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation hervor. Es ist deutlich zu erkennen, dass anfangs beide Sorten in beiden Varianten einen gleich hohen F_v/F_m -Index von 0,85 aufwiesen. Nach 24 h im Freiland war ein deutlicher Abfall auf ein niedrigeres Niveau zu erkennen. Wobei der Abfall der Werte in der Variante Strahlungsstress signifikanter war, als in der Variante Kontrolle. In den Folgetagen stiegen die Werte in beiden Varianten wieder an. Das Ausgangsniveau wurde jedoch nicht wieder erreicht. Unterschiede zwischen den beiden Sorten waren im Messzeitraum nicht signifikant.

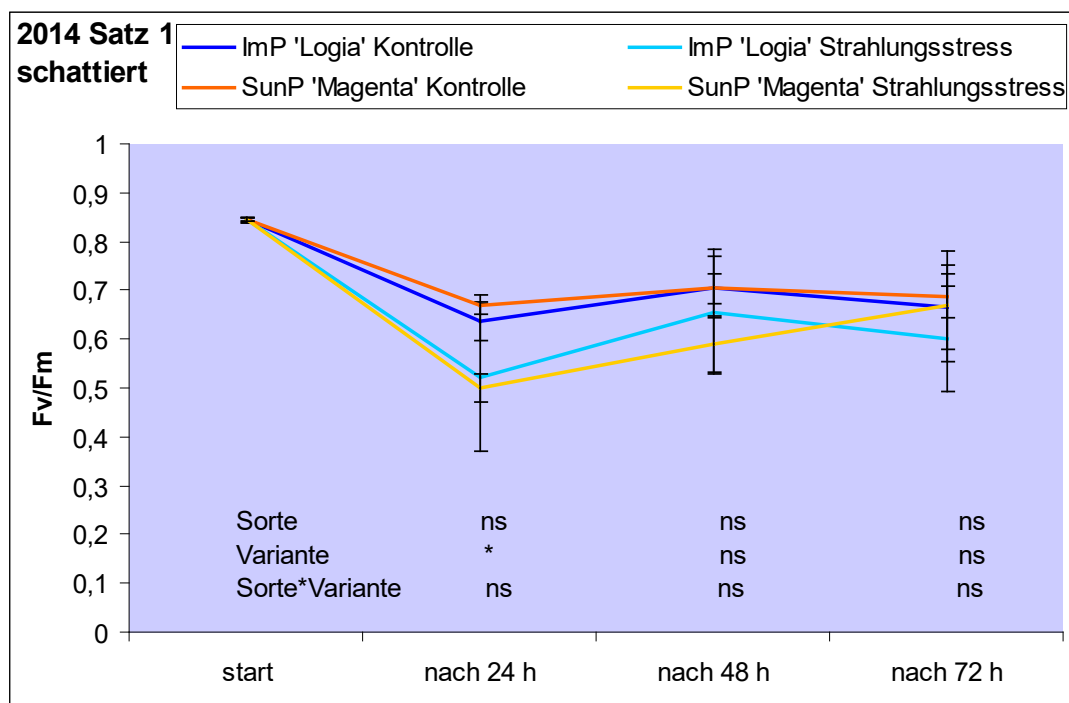


Abb. 37: F_v/F_m -Indizes der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und Strahlungsstress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

6.3.4 Diskussion und Zusammenfassung

Zur Identifizierung von Strahlungsstressreaktionen an *Impatiens*-Genotypen wurden morphologische, anatomische und physiologische Merkmale während der Stressapplikation erhoben. Um die Effekte zu steigern, wurden sensibilisierte Pflanzen, also Pflanzen aus einer sehr stark schattierten Anzucht, verwendet und auf einem Prüfstand mit verschiedenen Stressvarianten ausgestellt.

Die morphologischen Untersuchungen ergaben, dass alle Genotypen nach wenigen Tagen unter Strahlungsstress und Kombi-Stress mit ausgeprägten Nekrosen reagierten. Besonders intensiv reagierte die Sorte SunP 'Magenta'. Statistisch wurde gesichert, dass die SunPatiens in den ersten Tagen im Freiland eine signifikant höhere Empfindlichkeit gegenüber Strahlung zeigten, als die klassischen *Impatiens*. Anatomisch zeigten sich Nekrosen durch ein kollabiertes Palisadenparenchym mit denaturierten Chloroplasten und einer zerstörten oberen Epidermis. Hinsichtlich der Art der Schädigung waren zwischen den Sorten keine Unterschiede zu erkennen.

Neben der Identifizierung morphologischer und anatomischer Stressreaktionen war es auch Ziel der Arbeit, einfach messbare stressphysiologische Merkmale daraufhin zu überprüfen, ob sie als Frühindikator zur Identifizierung von Strahlungsstress geeignet sind. Die Messergebnisse der stomatären Leitfähigkeit zeigen deutlich, dass der Zeitpunkt der Messung und zusätzlicher Trockenstress die Stomataweite weitaus stärker beeinflussen, als der Strahlungsstress. Der berechnete CWSI verdeutlichte die Schwierigkeit der Reproduktion konstanter Messwerte. Tendenziell wiesen Pflanzen unter Strahlungsstress einen höheren CWSI auf. Auf Grund der großen Streuung der Daten, konnten jedoch zwischen den Versuchsjahren keine reproduzierbaren signifikanten Unterschiede zwischen den Genotypen identifiziert werden. Auch die Chlorophyll-Fluoreszenz bestätigte den Einfluss des Messzeitpunktes. Nach 24 h sank erwartungsgemäß der F_v/F_m -Index ab. Dabei wurden die Pflanzen unter Strahlungsstress nach 24 h stärker beeinflusst als die Variante Kontrolle. An den Folgetagen lag jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten vor.

Pflanzen der Variante Kontrolle zeigten bei morphologischen Untersuchungen keine ausgeprägten Nekrosen. Pflanzen unter Strahlungsstress und Kombi-Stress hingegen schon. Die physiologischen Untersuchungen zeigten jedoch zwischen den Varianten ausgeprägte Symptomanalogien. Es wird daher angenommen, dass das ähnliche Verhalten der Variante Kontrolle zur Variante Strahlungsstress durch die in den Varianten geltenden Lufttemperaturunterschiede von bis zu 10 K bewirkt wurde. Es liegt daher die Vermutung nah, dass Pflanzen unter Strahlungsstress physiologisch ähnlich reagieren, wie Pflanzen unter höheren Temperaturen.

6.4 Spezifische Reaktionen von *Impatiens*-Genotypen auf UV-Strahlung

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass sensibilisierte *Impatiens* auf hohe Einstrahlung mit ausgeprägten Nekrosen reagierten, die im Wesentlichen auf einer Zerstörung der Epidermis und des Palisadenparenchyms beruhten. Um zu prüfen, ob die genannte Schädigung durch spezifische UV-Strahlungseffekte hervorgerufen wurde, wurden sensibilisierte Pflanzen unter einem UV-undurchlässigen (Kontrolle) sowie unter einem UV-durchlässigen (UV-Stress) Foliendach aufgestellt. Auch in diesem Teilprojekt wurden morphologische und physiologische Merkmale erhoben.

6.4.1 Morphologische Reaktionen

Die auf den der Variante UV-Stress ausgestellten Pflanzen, zeigten nach nur wenigen Tagen weißlich-braune Aufhellungen auf der Blattoberseite. Vergleichbar waren diese Symptome mit den Pflanzen aus der Variante Strahlungstress. Aus diesem Grund war eine Übertragung des entwickelten Boniturschemas (Abb. 14) auf die Pflanzen der Variante UV-Stress möglich. Abb. 38 zeigt das Ergebnis der Bonitur der Nekrosen nach fünf Tagen Stressapplikation in den Versuchsjahren 2013 und 2014. Es ist zu erkennen, dass in beiden Versuchsjahren die Pflanzen in der Variante Kontrolle symptomfrei blieben. Die Pflanzen der Variante UV-Stress zeigten hingegen ausgeprägte Nekrosen. Im Versuchsjahr 2013 waren diese Nekrosen bei den Sorten ImP 'Moorea', ImP 'Timor' und SunP 'Orange' nur leicht ausgeprägt. Die Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' reagierten auf den UV-Stress stärker. Im Versuchsjahr 2014 blieb die Sorte ImP 'Timor' unter der UV-durchlässigen Folie symptomfrei. Allerdings zeigten die Sorten ImP 'Logia', ImP 'Moorea' und SunP 'Magenta' vereinzelt Blätter mit Nekrosen.

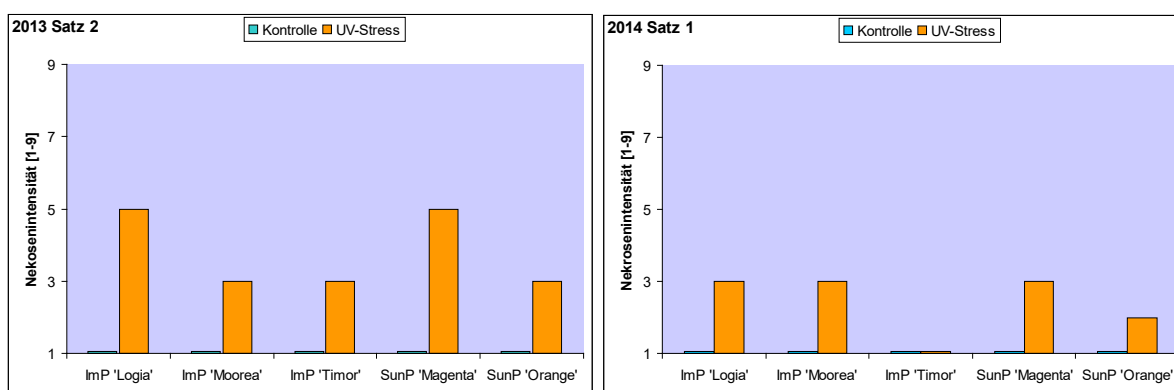


Abb. 38: Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Kontrolle und UV-Stress nach fünf Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2013 und 2014

Abb. 39 verdeutlicht die Reaktionen am Beispiel der Sorte ImP 'Logia' im Versuchsjahr 2013. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die Pflanzen der Variante Kontrolle symptomfrei blieben. Unter dem UV-durchlässigen Foliendach zeigten die Pflanzen hingegen deutliche Reaktionen. Auf Grund dass die Temperatur, die Luftfeuchte und auch der Anteil an PAR der ins Foliendach einfallenden Strahlung unter beiden Dächern identisch waren, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um eine UV-induzierte Schädigung handelt.

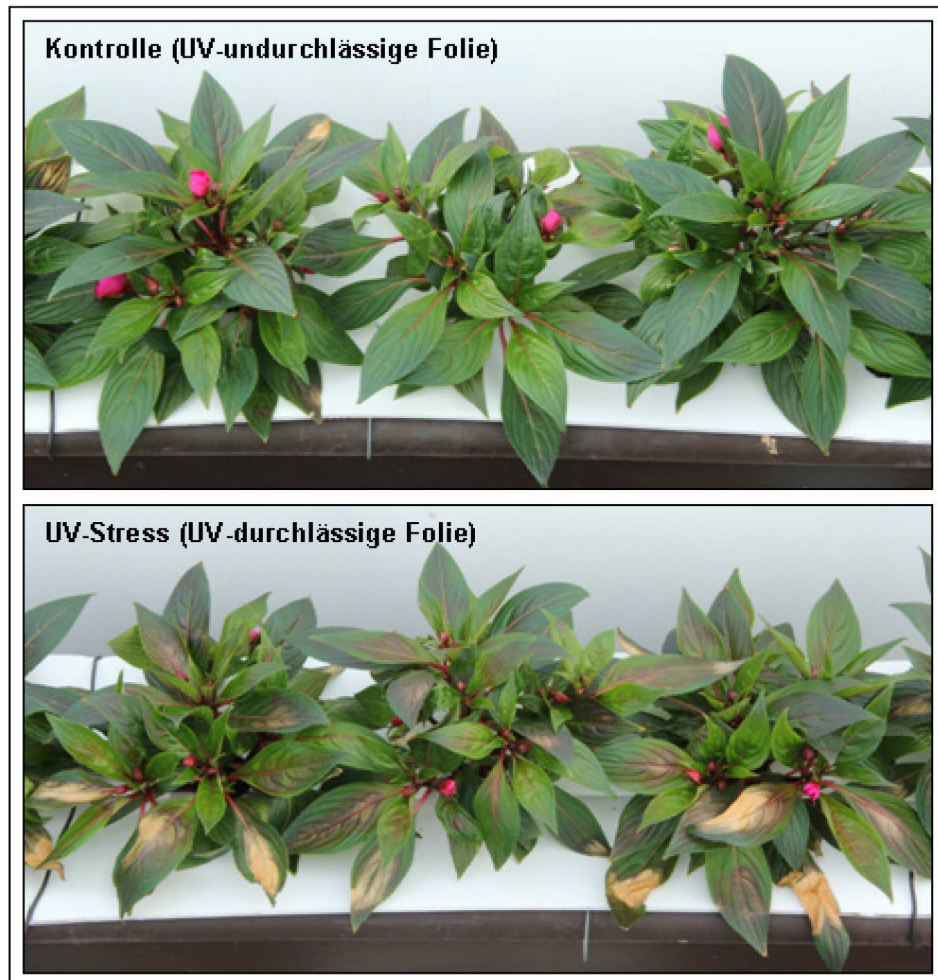


Abb. 39: Reaktionen der Sorte ImP 'Logia' nach fünf Tagen Stressapplikation unter Kontrolle (UV-undurchlässiges Foliendach) und UV-Stress (UV-durchlässiges Foliendach)

6.4.2 Physiologische Reaktionen

Untersuchungen zu den physiologischen Reaktionen der Pflanzen fanden zudem auch in der Variante UV-Stress statt und werden im Folgenden mit den Untersuchungen der Pflanzen aus der Variante Kontrolle verglichen. Es wurden, wie im Teilprojekt zuvor, die stomatäre Leitfähigkeit, der Wärmehaushalt und die Chlorophyll-Fluoreszenz untersucht.

Stomatäre Leitfähigkeit

Aus der Abb. 40 geht die stomatäre Leitfähigkeit der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter UV-Stress im Vergleich zur stomatären Leitfähigkeit der Variante Kontrolle hervor. Bezogen auf die Sorte SunP 'Magenta' ist zu erkennen, dass ein hoher Ausgangswert vorausging, der nach 24 h abfiel und in den Folgetagen wieder anstieg. Unter UV-Stress ist jedoch zu erkennen, dass die Sorte SunP 'Magenta' im Vergleich zur Variante Kontrolle einen Tag später auf das Ausgangsniveau zurückging. Die Sorte ImP 'Logia' zeigte hingegen schon zu Anfang ein niedriges Ausgangsniveau, dem in der Variante Kontrolle ein Abfall folgte und in den Folgetagen ein Anstieg auf ein weit höheres Niveau als das Ausgangsniveau. Unter UV-Stress ist jedoch zu erkennen, dass sich die stomatäre Leitfähigkeit über die Zeit nicht signifikant zum Vortag veränderte. Werte unter 100 mmol H₂O/m²s weisen darauf hin, dass die Stomata der Sorte ImP 'Logia' unter UV-Stress weitgehend geschlossen waren und damit auch die Photosynthese beeinträchtigt wurde.

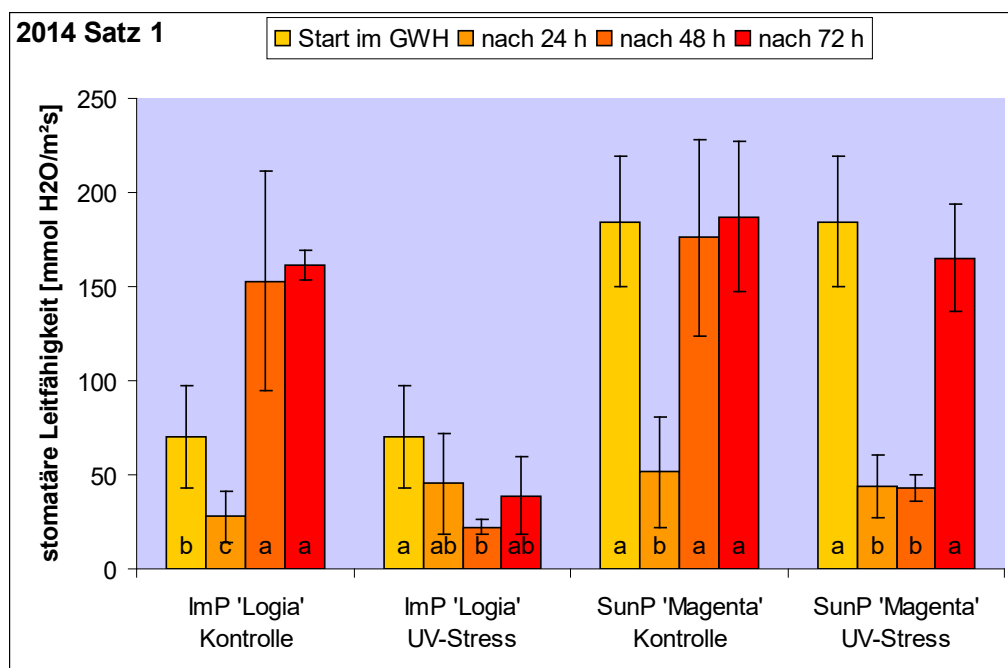


Abb. 40: Stomatäre Leitfähigkeit der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und UV-Stress in den ersten vier Tagen der Stressapplikation (signifikante Unterschiede zwischen den Tagen sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 9$)

Wärme- und Wasserhaushalt

Abb. 41 zeigt den CWSI zur Bewertung des Wärme- und Wasserhaushaltes, der durch UV-Stress im Allgemeinen leicht erhöht wurde. Dieser Effekt ist jedoch nur bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Timor' signifikant. Bei den Sorten ImP 'Moorea', SunP 'Magenta' und SunP 'Orange' lagen keine signifikanten Unterschiede vor. Eine Wiederholung dieser Untersuchungen im Versuchsjahr 2014 konnte diesen Effekt nicht bestätigen. Durch die Streuung der Daten war kein signifikanter UV-Stress der Sorte ImP 'Logia' zu erkennen. Anders reagierte die Sorte SunP 'Magenta'. Hier zeigte sich, dass der CWSI der Pflanzen unter UV-Stress, unter sonst klimatisch gleichen Bedingungen, signifikant unter dem Niveau der Variante Kontrolle lagen.

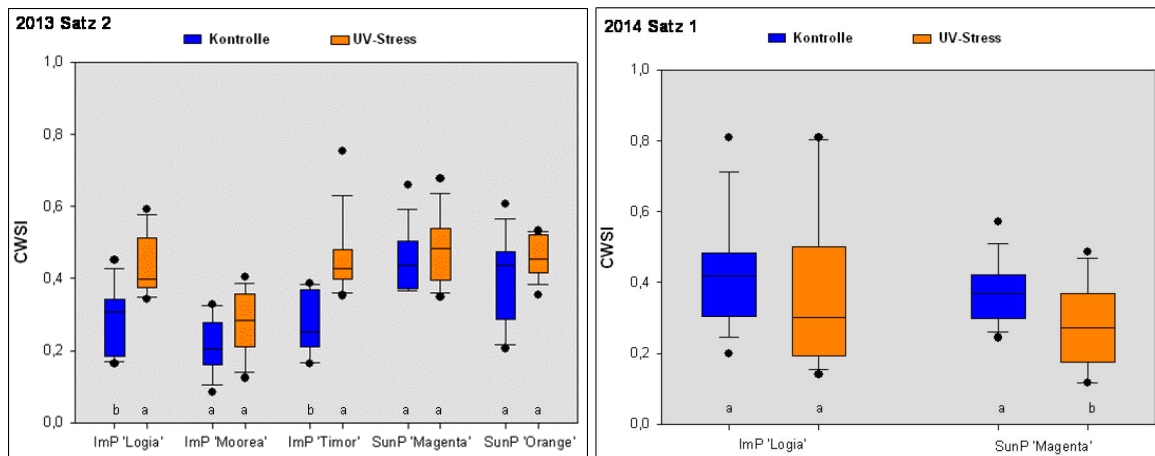


Abb. 41: CWSI verschiedener *Impatiens*-Sorten unter Kontrolle und UV-Stress drei Tage nach Stressbeginn (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)

Chlorophyll-Fluoreszenz

Abb. 42. zeigt die Chlorophyll-Fluoreszenz der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' der Variante UV-Stress im Vergleich zur Variante Kontrolle. Auf Grund der vorherigen Daten, überrascht das Ergebnis der Chlorophyll-Fluoreszenz nicht. Zu Beginn der Stressapplikation lag das Verhältnis von F_v/F_m beider Sorten auf einem hohen Niveau. Nach nur 24 h ist auch hier ein Abfall zu erkennen. Nach 48 h und 72 h trat jedoch keine Erholung des PSII auf, da die Werte auf einem konstant niedrigen Niveau blieben. Signifikante Unterschiede lagen weder zwischen den Sorten noch zwischen den Varianten vor.

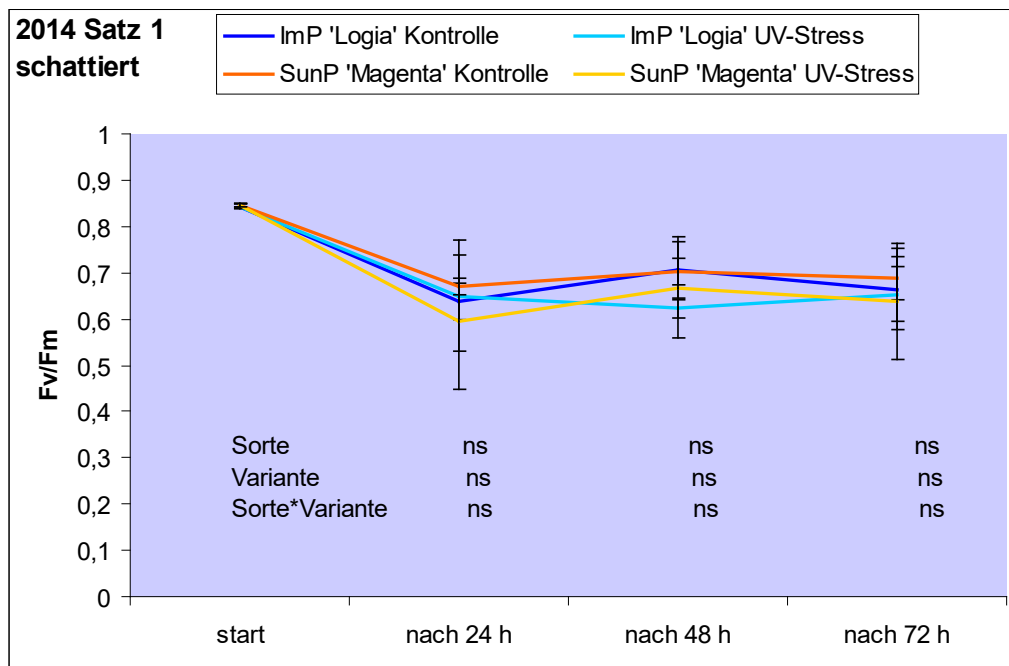


Abb. 42: F_v/F_m -Indizes der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Kontrolle und UV-Stress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

6.4.3 Diskussion und Zusammenfassung

Für die Identifizierung der Reaktionen verschiedener *Impatiens* Genotypen auf UV-Strahlung erfolgte zusätzlich zur Kontrolle eine Stressapplikation unter einem UV-durchlässigen Foliendach, mit begleitenden morphologischen und physiologischen Messungen. Die eingesetzten Foliendächer hatten den Vorteil, dass Temperatur, Luftfeuchte und PAR identisch waren. Lediglich der für die Pflanzen zur Verfügung stehende Anteil an UV-Strahlung unterschied sich. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist daher gegeben.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass oberseitige Blattnekrosen nur Pflanzen unter der UV-durchlässigen Folie auftraten. Diese Reaktionen waren vergleichbar mit denen der Variante Strahlungsstress. Lediglich die Intensität der beobachteten Reaktionen unter UV-Stress war im Vergleich zur Variante Strahlungsstress nicht so stark ausgeprägt. Es ist daher fraglich, ob die beobachteten Reaktionen im Freiland nicht auch UV-Schäden sind, die sich nur stärker ausgeprägt haben, da der Anteil an UV-Strahlung im Freiland höher war, als unter dem UV-durchlässigen Foliendach. Eine Variante mit gleicher UV-Belastung und unterschiedlichem PAR-Anteil könnte die Antwort dafür geben, welche Reaktionen auf einen erhöhten UV-Anteil und welche Reaktionen auf eine erhöhte Globalstrahlung zurückzuführen sind. Dies wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt und hätte wahrscheinlich auch nur unter Kunstlichtbedingungen getestet werden können.

Auf physiologischer Ebene konnte das klare Erscheinungsbild zwischen den Varianten Kontrolle und UV-Stress nicht bestätigt werden. Die stomatäre Leitfähigkeit der Sorten Imp 'Logia' und SunP 'Magenta' unter UV-Stress zeigte eine signifikante Verringerung. Der CWSI dieser Sorten unter UV-Stress unterschied sich jedoch nicht signifikant und war nicht reproduzierbar. Zudem konnte auch mit der Chlorophyll-Fluoreszenz kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden.

6.5 Einfluss der Anzuchtbedingungen auf Strahlungstressreaktionen

Um den Einfluss von Anzuchtbedingungen auf das Anpassungspotential von *Impatiens* an Klimastressbedingungen zu studieren, wurden Pflanzen bei unterschiedlichen Strahlungsbedingungen kultiviert und in einem Freilandprüfstand mit verschiedenen Stressvarianten ausgestellt. Nachfolgend wird der Einfluss des Strahlungsangebotes während der Anzucht auf morphologische, anatomische und physiologische Reaktionen während und nach einer Stressapplikation im Freiland geschildert.

6.5.1 Morphologische Reaktionen

Zur Bewertung morphologischer Reaktionen wurde das im Kapitel 5.4.2.1 erläuterte Boniturschema für Welke- und Nekrosenintensität während der Stressapplikation täglich an allen Pflanzen in den ausgestellten Pflanzgefäßen angewendet. Aus der Abb. 43 geht Welke- und Nekrosenintensität der Pflanzen unter Strahlungstress und Kombi-Stress im Vergleich zur Variante Kontrolle nach einer unschattierten und schattierten Anzucht hervor. Dargestellt sind die Bewertungen nach sieben Tagen Stressapplikation in den Versuchsjahren 2012 und 2014. In der Abb. 43 zeigte sich ein allgemein stark ausgeprägter Einfluss der Anzuchtbedingungen. Nach unschattierter Anzucht wurden an allen Genotypen unter Strahlungstress und Kombi-Stress keine oder nur leichte Nekrosen beobachtet. Ein signifikanter Unterschied zwischen den SunPatiens und den klassischen *Impatiens* lag nicht vor. Des Weiteren wurde in der Variante Kombi-Stress eine Intensivierung der Welke, aber keine Intensivierung der Nekrosenintensität beobachtet und die Pflanzen unter Kombi-Stress nach unschattierter Anzucht welkten stärker, als nach schattierter Anzucht, aber reagierten nicht mit einer stärkeren Nekrosenintensität. In der Variante Kontrolle blieben alle Genotypen nach einer unschattierten und schattierten Anzucht symptomfrei. Alle fünf durchgeführten Vegetationsversuche zeigten zusammengefasst ähnliche Ergebnisse (Anhang 1). Das Auftreten von Nekrosen nach unschattierter und schattierter Anzucht ist somit ein systematischer Effekt und kein zufälliges Ereignis.

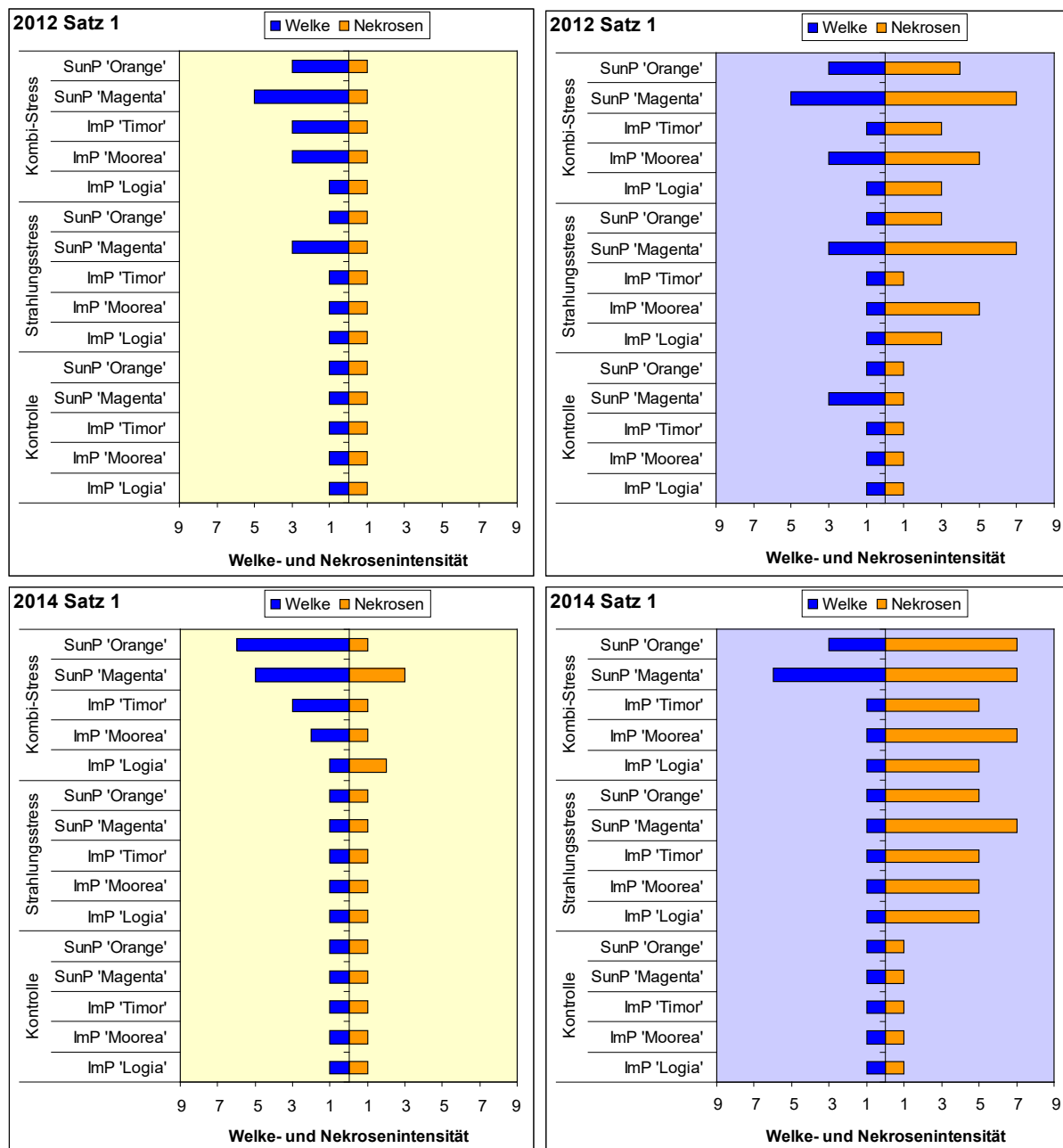


Abb. 43: Welke- und Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Genotypen aus unschattierter (links) und schattierter (rechts) Anzucht nach sieben Tagen Stressapplikation unter Kontrolle, Strahlungsstress und Kombi-Stress im Versuchsjahr 2012 und 2014

6.5.2 Anatomische Reaktionen

Wie im Kapitel 5.4.1.2 beschrieben, wurden für histologische Untersuchungen Blattproben entnommen und Blattquerschnitte erstellt. In Abb. 44 sind obere Epidermis, Palisadenparenchym mit rosa angefärbten Chloroplasten, Schwammparenchym und untere Epidermis bei allen Sorten deutlich zu erkennen. Bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Moorea' deutete sich sogar ein zweischichtiges Palisadenparenchym an. Die Sorte SunP

'Magenta' wies eine schwächere Ausfärbung des Blattquerschnittes auf, was auf eine etwas lockere Struktur im Bereich des Palisaden- und Schwammparenchyms hindeutet. Zwischen den Sorten ImP 'Logia', ImP 'Moorea', ImP 'Timor' und SunP 'Orange' lagen hingegen keine sichtbaren Unterschiede vor.

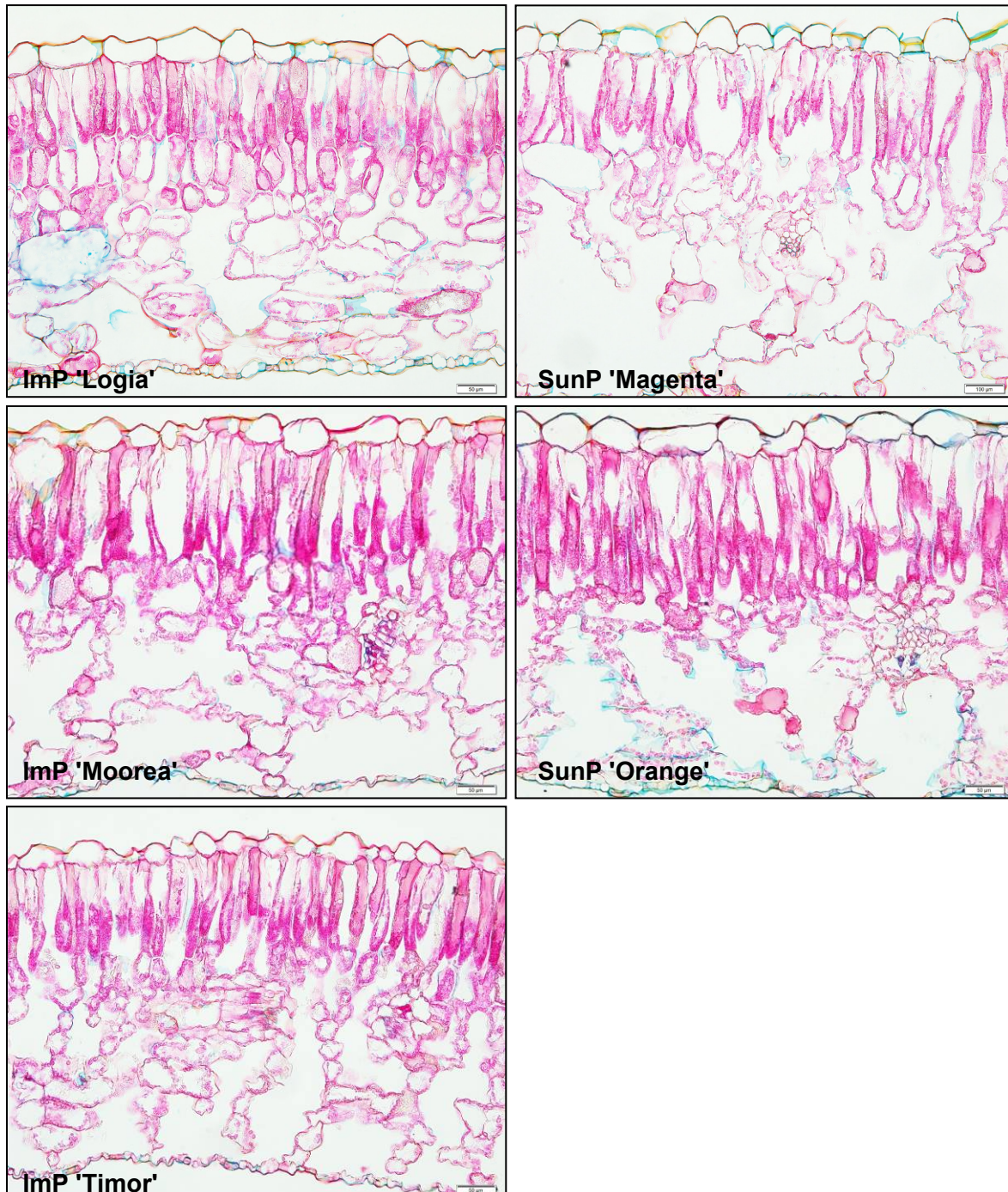


Abb. 44: Blattquerschnitte verschiedener unschattiert angezogener *Impatiens*-Sorten nach sieben Tagen Strahlungstressapplikation auf dem Freilandprüfstand im Versuchsjahr 2014 (Maßstab = 50 µm)

Zur Prüfung der Auswirkung von Anzuchtbedingungen auf die Stressreaktionen werden nun die Blattquerschnitte nach unschattierter und schattierter Anzucht und nach darauffolgenden sieben Tagen Strahlungstress miteinander verglichen. Aus der Abb. 45 geht am Beispiel der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' ein stark ausgeprägter Effekt der Anzuchtbedingungen hervor. Nach schattierter Anzucht und sieben Tagen Strahlungstress sind die Epidermiszellen zerstört und das Palisadenparenchym stark deformiert. Die rosa angefärbten Chloroplasten in den Zellen des Palisadenparenchyms sind nach schattierter Anzucht vollständig denaturiert. Die einheitlichen Strukturen, die nach einer unschattierten Anzucht und sieben Tagen Strahlungstress zu erkennen waren, waren nach einer schattieren Anzucht und sieben Tagen Strahlungstress nicht mehr zu erkennen. Lediglich das Schwammparenchym und die untere Epidermis blieben symptomfrei.

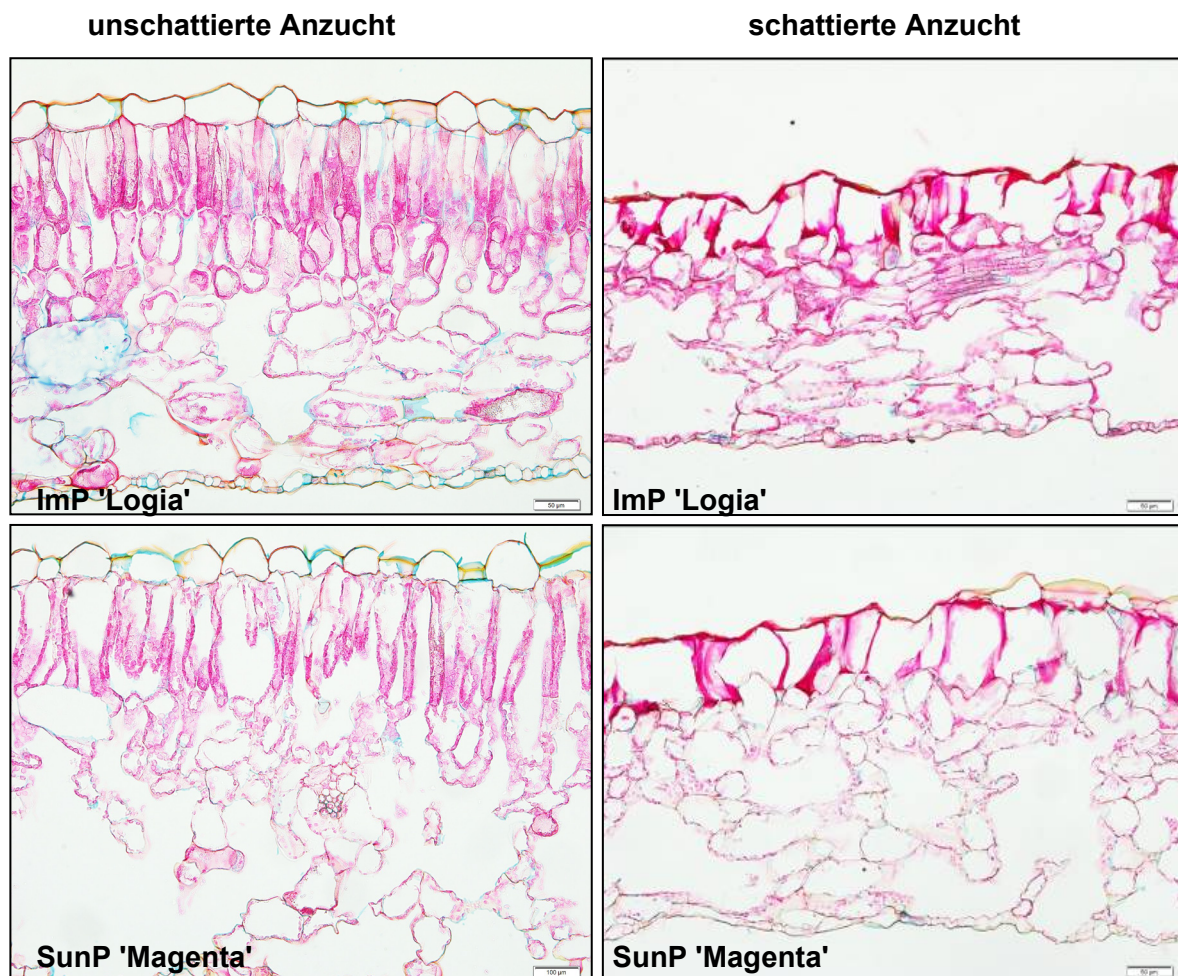


Abb. 45: Vergleich der Blattquerschnitte der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach unschattierter und schattierter Anzucht und nach sieben Tagen Strahlungstress (Maßstab = 50 µm)

6.5.3 Physiologische Reaktionen

Der Vergleich von morphologischen und anatomischen Reaktionen an unschattiert und schattiert angezogenen Versuchspflanzen zeigt deutlich die Sensitivität der schattiert angezogenen Versuchspflanzen unter Strahlungstress. Im folgenden Kapitel werden die physiologischen Reaktionen der Pflanzen aus beiden Anzuchtbedingungen während der Stressapplikation miteinander verglichen. Dies soll prüfen, ob strahlungsstresstolerante Genotypen eine dafür typische physiologische Reaktion zeigen.

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit wurde, wie in den Kapiteln zuvor beschrieben, mit dem GFS 3000 während der Stressapplikation an ausdifferenzierten Blättern gemessen. Im Versuchsjahr 2012 erfolgten die Messungen aus klimatischen und technischen Gründen sechs Tage nach Stressbeginn und im Versuchsjahr 2013 zwei Tage nach Stressbeginn. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigt die Abb. 46. Daraus geht hervor, dass im Versuchsjahr 2012 in der Variante Strahlungstress die unschattiert angezogenen Versuchspflanzen, mit Ausnahme der Sorte ImP 'Timor', eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit aufwiesen, als die schattiert angezogenen Versuchspflanzen. Dieser signifikante Effekt der Anzuchtvariante wurde auch im Versuchsjahr 2013 zwei Tage nach Beginn der Stressapplikation beobachtet. Demnach können Pflanzen nach einer unschattierten Anzucht unter Strahlungstress eine höhere stomatäre Leitfähigkeit ausweisen, als Pflanzen nach einer stark schattierten Anzucht. Die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen unter Kombi-Stress lag hingegen in beiden Versuchsjahren auf einem sehr geringen Niveau. Die stomatären Leitfähigkeit wird demnach stark vom zusätzlichen Trockenstress beeinflusst. Zudem wurden die unschattiert angezogenen Pflanzen stärker beeinflusst. Signifikante Unterschiede der Anzuchtvariante unter Kombi-Stress wurden nur bei der Sorte ImP 'Logia' im Versuchsjahr 2012 festgestellt.

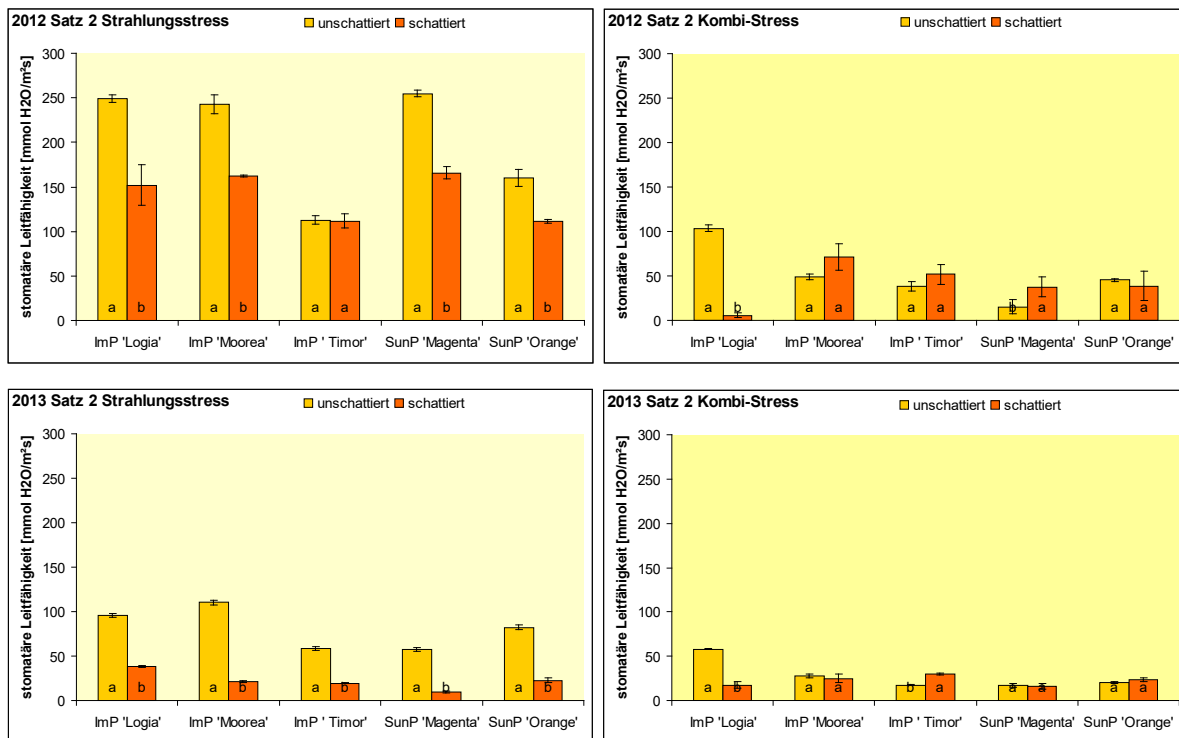


Abb. 46: Stomatäre Leitfähigkeit verschiedener *Impatiens*-Sorten nach unschattierter und schattierter Anzucht unter sechs Tagen (oben) und zwei Tagen (unten) Strahlungsstress und Kombi-Stress (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3$)

Wärme- und Wasserhaushalt

Auskunft über den Wärme- und Wasserhaushalt erbringt die Pflanzentemperatur, die mit einer Thermokamera erfasst wurde. Von allen Pflanzen wurden Thermalbilder erstellt und der CWSI berechnet. Im Versuchsjahr 2012 lagen die Indizes beider Anzuchtvarianten auf einem gleich niedrigen Niveau (Abb. 47). Unterschiede zwischen der unschattierten und schattierten Anzucht sind auf Grund der großen Streuung der Daten nicht zu erkennen. Nach unschattierter Anzucht lag die Variante Kontrolle sogar teils über der Variante Strahlungsstress. Im Versuchsjahr 2013 zeichnete sich ab, dass nach stark schattierter Anzucht unter Strahlungsstress ein leicht höherer Index zu erkennen war, als nach unschattierter Anzucht. Die zu erkennenden Effekte sind jedoch eher zufällig, da in beiden Versuchsjahren kein statistisch gesichertes Ergebnis festzustellen war.

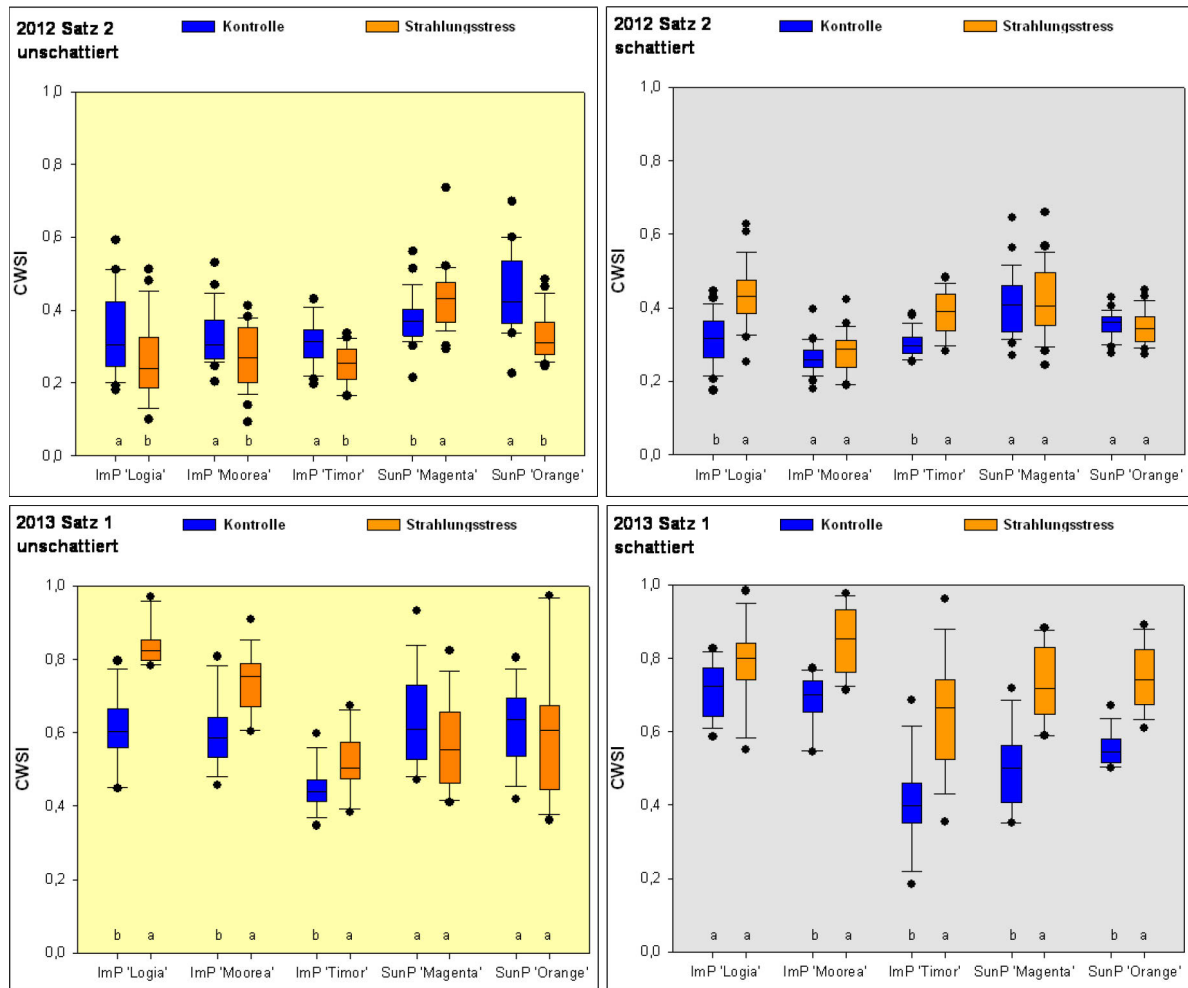


Abb. 47: CWSI verschiedener *Impatiens*-Sorten nach ungeschättigter und schättigter Anzucht unter drei Tagen Kontrolle und Strahlungsstress (10. und 90. Perzentil, Median, 1. und 3. Quartil und Ausreißer; signifikante Unterschiede innerhalb der Sorte sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; Kruskal-Wallis, $p < 0,05$, $n = 9$)

Chlorophyll-Fluoreszenz

Die Chlorophyll-Fluoreszenz wurde während der Stressapplikation an ausdifferenzierten Blättern erfasst und der Index F_v/F_m berechnet. Vor Beginn der Stressapplikation, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation wurden Pflanzen aus beiden Anzuchtvarianten unter Strahlungsstress und aus der Variante Kontrolle beprobt. Die Messergebnisse dieser Untersuchungen gehen aus der Abb. 48 hervor. Es ist zu erkennen, dass nach ungeschättigter Anzucht F_v/F_m auf einem hohen Niveau lag. Nach 24 h fielen die Indizes der Sorte ImP 'Logia' aus der Variante Strahlungsstress und Kontrolle ab und lagen signifikant unter dem Niveau der Sorte SunP 'Magenta', die in beiden Varianten nur leicht unter das Ausgangsniveau abfiel. Nach 48 h war bei der Sorte ImP 'Logia' wieder eine Annäherung zum Ausgangsniveau zu erkennen. Der Index der Sorte ImP 'Logia' blieb unter Strahlungsstress auch noch nach 72 h unter dem Niveau der Sorte SunP 'Magenta'. Ein

Vergleich der Anzucht zeigt, dass der Index der Sorte SunP 'Magenta' nach unschattierter Anzucht unter Strahlungsstress im Verlauf der Stressapplikation deutlich über dem Niveau der Pflanzen nach stark schattierter Anzucht lag und dies also mit der Bewertung der Nekrosenintensität korreliert. Ebenso ist zu erkennen, dass bei der Sorte ImP 'Logia' nach schattierter Anzucht und nach 24 h Strahlungsstress kein signifikanter Unterschied zur unschattierten Anzucht festzustellen war.

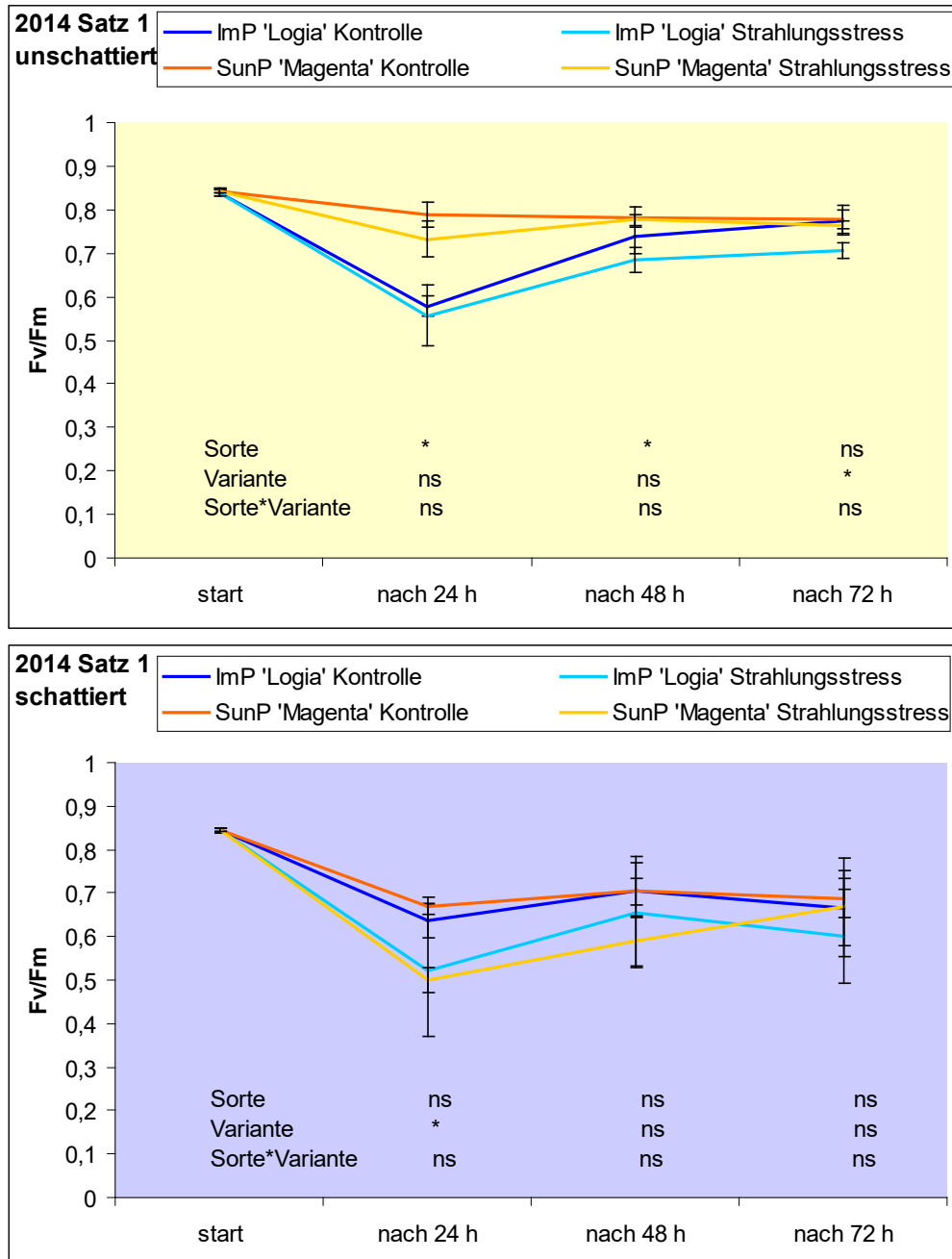


Abb. 48: F_v/F_m -Indizes der Sorte ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach unschattierter und schattierter Anzucht unter Kontrolle und Strahlungsstress zu Beginn, sowie 24 h, 48 h und 72 h nach Beginn der Stressapplikation (MANOVA; $p < 0,05$, $n = 9$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

6.5.4 Diskussion und Zusammenfassung

Um den Einfluss der Anzuchtbedingungen auf Stressreaktionen verschiedener *Impatiens*-Genotypen zu prüfen, wurden Versuchspflanzen nach einer unschattierten und schattierten Anzucht den im Methodenteil beschriebenen Stressbehandlungen ausgesetzt.

Bonituren zeigten, dass die unschattiert angezogenen *Impatiens* nach sieben Tagen Stressapplikation keine Nekrosen ausbildeten. Im Gegensatz dazu traten an den schattiert angezogenen Pflanzen unter den gleichen Stressbedingungen deutliche Schädigungen der oberen Epidermis und des Palisadenparenchyms auf. Die Messungen des Gaswechsels bestätigten, dass die schattiert angezogenen Pflanzen unter Strahlungsstress eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit aufweisen, als die unschattiert angezogenen. Da die stomatäre Leitfähigkeit jedoch auch von der Anzahl der Stomata abhängig ist, und diese durch das Strahlungsangebot während der Anzuchtphase beeinflusst wird, ist die Interpretation, ob eine geringe stomatäre Leitfähigkeit auf eine Strahlungsstresstoleranz hindeutet, eher vorsichtig zu betrachten. Bestätigt wird dies durch das Ergebnis der Untersuchungen der Pflanzen unter Kombi-Stress. Hier zeigt sich, dass zusätzlicher Trockenstress die unschattiert angezogenen Pflanzen stärker beeinflusste, als die schattiert angezogenen Pflanzen. Ob dies mit der Anzahl an Bewässerungsvorgängen während der Anzuchtphase zusammenhängen könnte, wird nachfolgend ausführlicher diskutiert.

Des Weiteren konnte mit Hilfe des CWSI kein signifikant gesichertes Ergebnis erzielt werden. Tendenziell wurde ein höherer Index von Pflanzen sowohl nach einer stark schattierten als auch nach einer unschattierten Anzucht unter Strahlungsstress festgestellt, jedoch war dieses Ergebnis nicht reproduzierbar. Lediglich die Chlorophyll-Fluoreszenz zeigte deutliche Unterschiede zwischen Pflanzen aus einer schattierten und einer unschattierten Anzucht unter Strahlungsstress. Signifikant waren diese Ergebnisse jedoch nur bei der Sorte SunP 'Magenta' nach 24 h Strahlungsstress. Trotz morphologisch starker Stressreaktionen lagen innerhalb der Sorte ImP 'Logia' keine Unterschiede zwischen den Anzuchtvarianten vor. Erwähnenswert ist zudem, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Sorten nach unschattierter Anzucht im F_v/F_m Verhältnis vorlag, dieses jedoch nicht mit der Bewertung der Nekrosenintensität übereinstimmt.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass kein eindeutiger Indikator der Stresstoleranz gefunden wurde, der als Frühindikator dienen kann. Lediglich die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen unter Strahlungsstress korrespondierte mit den morphologischen Stressreaktionen. Die morphologischen Stressreaktionen zeigten zudem, dass ein ausgeprägter Anzuchteffekt vorhanden war.

6.6 Einfluss der Anzuchtbedingungen auf *Impatiens*-Genotypen

Untersuchungen auf dem Freilandprüfstand verdeutlichen, dass die Bedingungen während der Anzucht einen erheblichen Einfluss auf die Intensität der Stressreaktionen von *Impatiens* nehmen können. Physiologische Untersuchungen während der Stressapplikation konnten dies jedoch nicht bestätigen. Im folgenden Kapitel findet daher eine Phänotypisierung der Pflanzen nach der Anzuchtphase statt. Verfolgt wird das Ziel, dass das Strahlungsangebot morphologische, anatomische und physiologische Eigenschaften und Reaktionsweisen der Pflanzen beeinflusst, die wiederum die Ausprägung von Stressreaktionen steuern.

6.6.1 Methodischer Hinweis

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Anzucht zur Sensibilisierung der Versuchspflanzen unter einem stark geminderten Strahlungsangebot. Dafür wurde ein Gewebe, welches 30 % der ins Gewächshaus einfallenden Einstrahlung durchlässt, installiert. Daneben erfolgte eine Anzucht von Pflanzen ohne Schattierung. Die Bewässerung aller Pflanzen erfolgte ab einem kritischen Wert von -150 hPa. Das unterschiedliche Strahlungsangebot zeigte Wirkungen im Wasserbedarf. Aus der Abb. 49 geht eine reduzierte Anzahl der Bewässerungsvorgänge der schattiert angezogenen Pflanzen hervor. Es ist zu erkennen, dass in den Versuchsjahren 2012 und 2014 die Anzahl der Bewässerungsvorgänge der schattiert angezogenen Pflanzen unter denen der unschattiert angezogenen Pflanzen lagen. Im Versuchsjahr 2012 fielen besonders die Tischgruppen 1 und 2 sowie 11 und 12 durch deutlich weniger Bewässerungsvorgänge auf. Daher wurden diese in den Versuchsjahren 2013 und 2014 nicht berücksichtigt. Zudem ist zu erkennen, dass die SunPatiens (Sorten 4 und 5) einen deutlich höheren Wasserbedarf hatten, als die klassischen *Impatiens* (Sorten 1, 2 und 3).

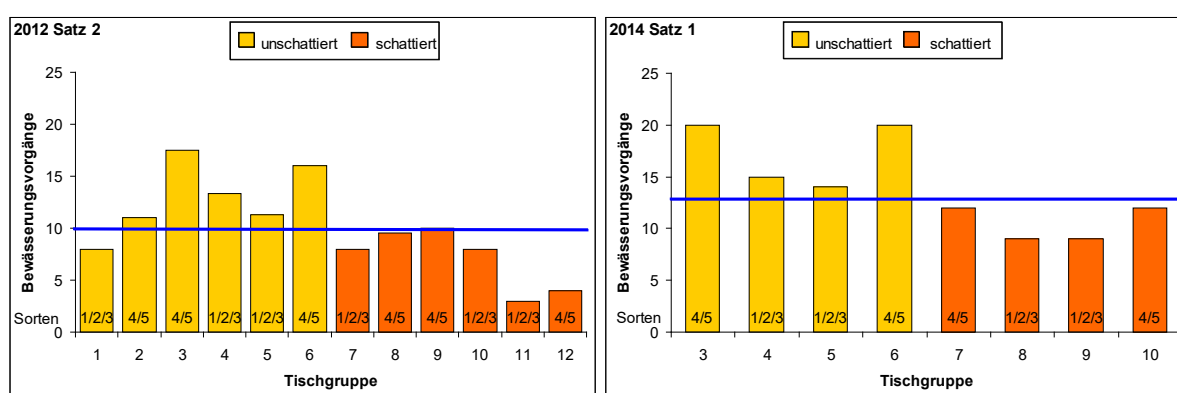


Abb. 49: Anzahl der Bewässerungsvorgänge verschiedener *Impatiens*-Sorten in einer 10-wöchigen Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot in den Versuchsjahren 2012 und 2014 (— Durchschnitt der Bewässerungsvorgänge)

6.6.2 Morphologische Pflanzenmerkmale

Die Unterschiede in Strahlungsangebot und Wasserbedarf während der Anzucht prägten die Pflanzenmorphologie signifikant. Am Beispiel der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' zeigt die Abb. 50 den Pflanzenaufbau nach einer 10-wöchigen Anzuchtphase. Unschattiert angezogene Pflanzen wiesen demnach einen kompakteren Wuchs mit kleineren Blättern auf, als schattiert angezogene Pflanzen. Zur besseren Phänotypisierung der Pflanzen wird im folgenden Kapitel der Einfluss der Anzuchtbedingungen auf die Stomatadichte, die Schattenbildfläche, die Kompaktheit und die Blattdicke bzw. spezifische Blattfläche geprüft.

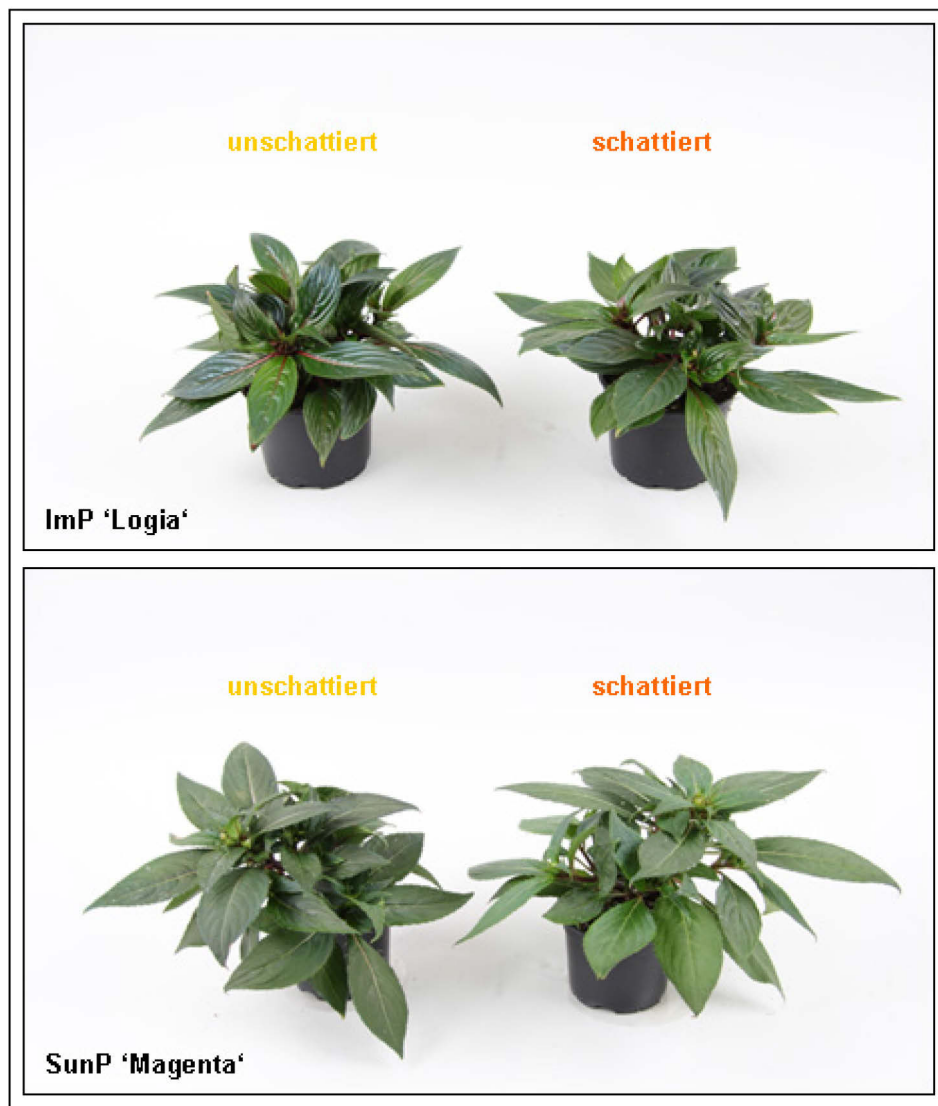


Abb. 50: Pflanzenaufbau der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach einer 10-wöchigen Anzucht bei unterschiedlichem Strahlungsangebot im Versuchsjahr 2012

Stomatadichte

Die Stomatadichte wird unter anderem von den herrschenden Strahlungsbedingungen während des Heranwachsens des Blattes beeinflusst (LARCHER 2001). Dies erfolgt in einer Optimumskurve und laut LARCHER (2001) gilt demnach die Faustregel: je höher das Strahlungsangebot, desto höher die Stomatadichte. Für die vorliegende Arbeit wird demnach abgeleitet, dass Pflanzen mit einer hohen Stomatadichte schneller auf Stress reagieren können, als Pflanzen mit einer geringen Stomatadichte. Um dies zu prüfen, wurde in der vorliegenden Arbeit die Stomatadichte mikroskopisch mit einem Rasterobjektiv erfasst. Die Abb. 51 zeigt die Anzahl der Stomata der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10 Wochen unter unschattierten und schattierten Anzuchtbedingungen. Es ist zu erkennen, dass eine unschattierte Anzucht zu einer signifikant höheren Stomatadichte führte. Dies war bei beiden Sorten signifikant. Zudem wies unter beiden Strahlungsangeboten die Sorte ImP 'Logia' eine signifikant höhere Stomatadichte auf, als die Sorte SunP 'Magenta'. Es lag daher sowohl ein Effekt der Anzucht aber auch ein Effekt des Genotyps vor.

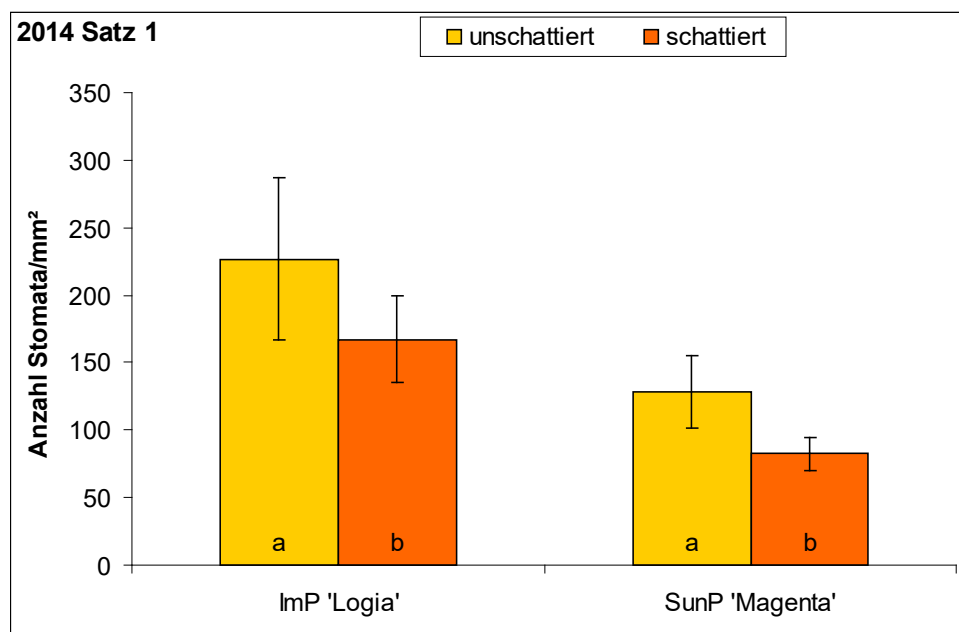


Abb. 51: Anzahl Stomata pro Blattfläche der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 10$)

Schattenbildfläche

Die Schattenbildfläche dient als Maß für die Wüchsigkeit und Pflanzengröße und wurde in der vorliegenden Arbeit in der Pflanzenaufsicht mit Hilfe der Schattenbildanalyse bestimmt.

Damit soll die Arbeitshypothese überprüft werden, ob stresstolerante Genotypen eine geringere Pflanzengröße aufweisen, als sensitive Genotypen. Aus der Abb. 52 geht das Ergebnis dieser Untersuchung am Beispiel der Versuchsjahre 2012 und 2014 hervor. Es ist zu erkennen, dass die Schattenbildfläche der beiden Sorten SunP 'Magenta' und SunP 'Orange' nach 10 Wochen Anzucht unter beiden Anzuchtbedingungen auf einem signifikant höheren Niveau lag, als die der klassischen *Impatiens*. Die SunPatiens zeichneten sich somit durch eine stärkere Wüchsigkeit aus. Einen Effekt der Anzuchtvariante ist jedoch nur bedingt zu erkennen. Lediglich im Versuchsjahr 2012 lagen, mit Ausnahme der Sorte ImP 'Timor', die unschattiert angezogenen Pflanzen signifikant unter dem Niveau der schattiert angezogenen Pflanzen. Dieser Effekt ist jedoch nicht nachhaltig nachweisbar. Im Versuchsjahr 2014 lag kein Effekt der Anzuchtbedingungen auf die Schattenbildfläche vor. Messwiederholungen bestätigten, dass kein nachhaltiger und systematischer Effekt der Anzuchtbedingungen vorlag, aber in den meisten Untersuchungen die SunPatiens ein signifikant größeres Wachstum aufwiesen, als die klassischen *Impatiens* (Anhang 2).

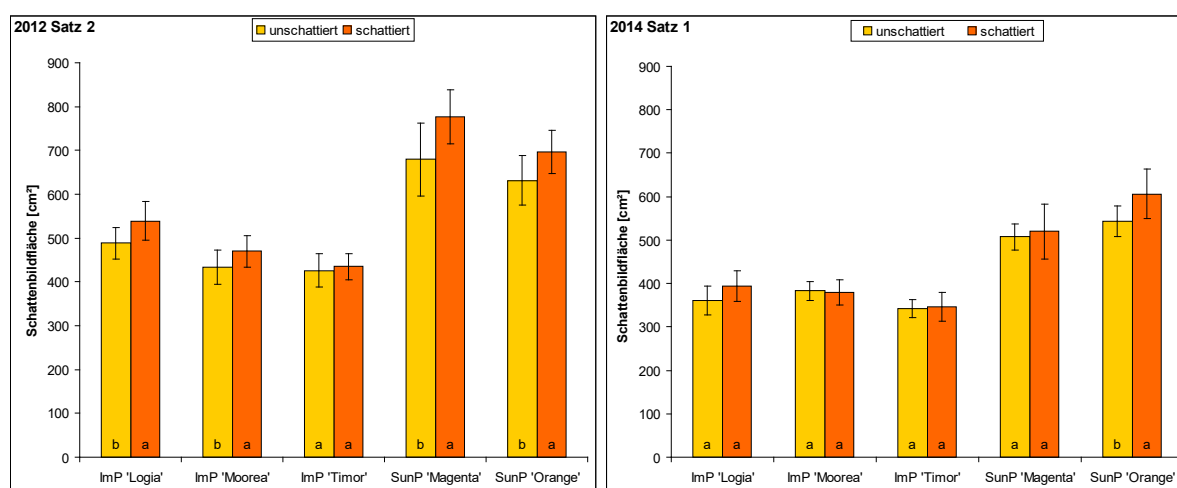


Abb. 52: Schattenbildfläche verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$)

Kompaktheit der Pflanzen

Die Kompaktheit der Pflanzen wurde als Quotient aus Anzahl Triebe zur Pflanzenhöhe bestimmt. Sie soll zur Prüfung der Arbeitshypothese dienen, ob strahlungsstresstolerante Pflanzen einen kompakteren Wuchs aufweisen, als strahlungsstressempfindliche Pflanzen. Für die Interpretation des Quotienten ist zu beachten, dass ein hoher Wert auf kompakt wachsende Pflanzen hindeutet. Die Abb. 53 zeigt das Ergebnis der Berechnungen am Beispiel der Versuchsjahre 2012 und 2014. Es ist zu erkennen, dass die unschattiert

angezogenen Pflanzen nach einer 10-wöchigen Anzucht eine hohe Kompaktheit aufwiesen. Die schattiert angezogenen Pflanzen zeigten hingegen eine geringere Kompaktheit. Im Versuchsjahr 2012 waren diese Unterschiede signifikant. Im Versuchsjahr 2014 lag ein signifikanter Unterschied nur noch bei den Sorten ImP 'Logia' und ImP 'Timor' vor. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass sich die klassischen *Impatiens* und die SunPatiens in ihrer Kompaktheit innerhalb beider Strahlungsangebote nicht signifikant unterschieden haben. Messwiederholungen bestätigten den ausgeprägten Effekt der Anzuchtbedingungen auf die Kompaktheit der Pflanzen, aber keinen Effekt zwischen den SunPatiens und den klassischen *Impatiens* (Anhang 2).

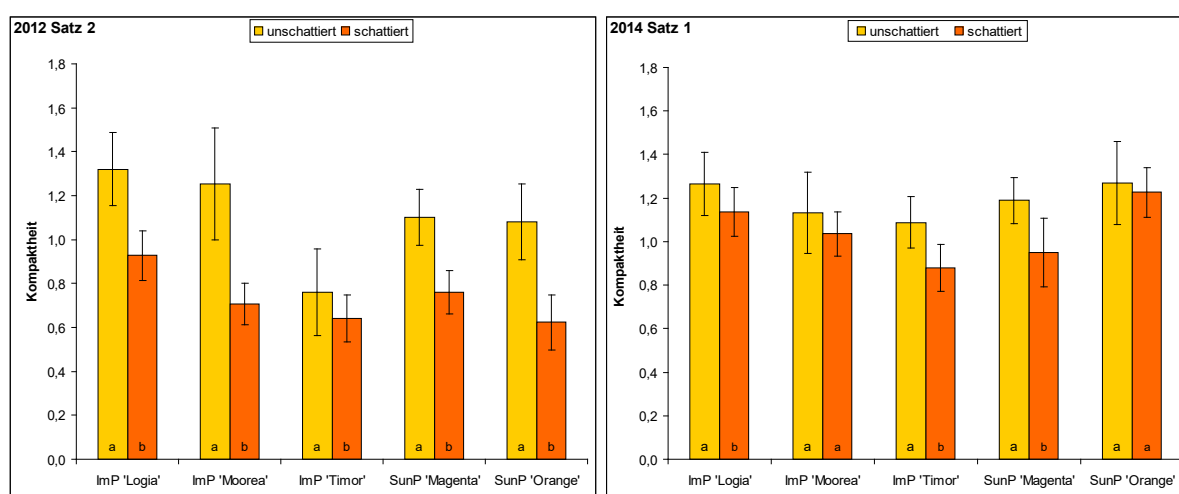


Abb. 53: Kompaktheit verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$)

Blattdicke und Spezifische Blattfläche

Wie im Kapitel 5.4.1.2 beschrieben, wurde aus Blattquerschnitten die Dicke der Blätter und die der einzelnen Gewebeschichten gemessen. Geprüft werden sollte damit die Arbeitshypothese, ob stresstolerante Genotypen dickere Blätter aufweisen, als stressensitive Genotypen. Aus der Abb. 54 geht die Blattdicke und die Dicke der Gewebeschichten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot aus den Versuchsjahren 2012 und 2013 hervor. Wie zu erkennen ist, lag im Versuchsjahr 2012 die Blattdicke der unshattiert angezogenen Pflanzen (100 % Strahlungsangebot) auf einem höheren Niveau, als die der schattiert angezogenen Pflanzen (30 % Strahlungsangebot). Innerhalb der Sorten war dieser Unterschied signifikant. Auch zeigt sich, dass die geringere Blattdicke auf eine deutliche Verringerung des Palisadenparenchyms zurückzuführen war. Weiterhin ist zu erkennen, dass die SunPatiens signifikant dickere Blätter aufwiesen, als die

klassischen *Impatiens*. Im Versuchsjahr 2013 konnte dieser Effekt nicht bestätigt werden. Es lag somit auch hier ein signifikanter Effekt der Anzuchtbedingungen innerhalb der Sorten vor.

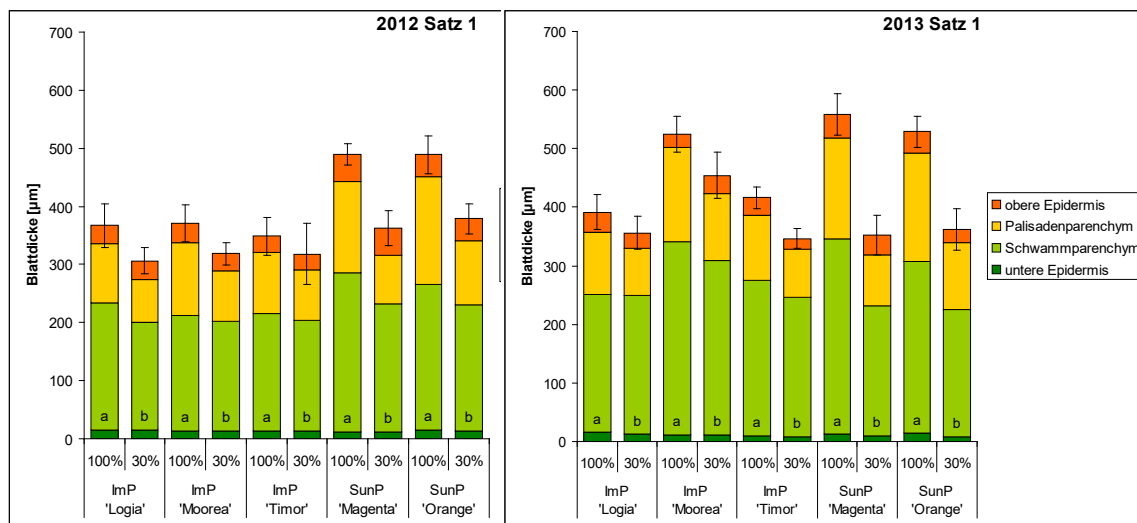


Abb. 54: Blattdicke und Dicke der Gewebeschichten von verschiedenen *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; (ANOVA, $p < 0,05$, $n = 50$))

Tab. 14 verdeutlicht die Verringerung der Blattdicke durch eine schattierte Anzucht. Im Versuchsjahr 2012 konnte eine Verringerung der Blattdicke von bis zu 25 % im Vergleich zur ungeschattierten Anzucht beobachtet werden. Im Versuchsjahr 2013 lag die Verringerung der Blattdicke sogar bei 37 %. In beiden Versuchsjahren konnte dies bei den Sorten SunP 'Magenta' und SunP 'Orange' beobachtet werden. Es lag zudem ein signifikanter Unterschied in der Verringerung der Blattdicke zwischen den klassischen *Impatiens* und den SunPatiens vor. Dies verdeutlicht noch einmal, dass die Verringerung der Blattdicke bei den SunPatiens größer war, wie bei den klassischen *Impatiens*.

Tab. 14: Verringerung der Blattdicke verschiedener *Impatiens*-Sorten der schattierten Anzucht zur ungeschattierten Anzucht in den Versuchsjahren 2012 und 2013

Sorten	Verringerung [%] 2012	Verringerung [%] 2013
ImP 'Logia'	16,56	8,99
ImP 'Moorea'	14,21	13,33
ImP 'Timor'	8,78	16,86
SunP 'Magenta'	25,86	37,05
SunP 'Orange'	22,56	31,90

Die Herstellung und Präparation von Blattquerschnitten ist eine eher aufwändige Methode zur Erfassung der Blattdicke. Ein methodisch weitaus einfacheres Verfahren ist die Erfassung der spezifischen Blattfläche, die als Quotient aus Blattfläche und Trockengewicht ermittelt wird. Eine geringe spezifische Blattfläche deutet demnach auf dicke Blätter hin. Aus der Abb. 55 geht die spezifische Blattfläche nach einer 10-wöchigen Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot aus den Versuchsjahren 2012 und 2013 hervor. Es ist zu erkennen, dass die spezifische Blattfläche der schattiert angezogenen Pflanzen in beiden Versuchsjahren über dem Niveau der unschattiert angezogenen Pflanzen lag. Dieser Unterschied war bei allen Sorten signifikant. Zudem zeigten die SunPatiens eine signifikant höhere spezifische Blattfläche als die klassischen *Impatiens*. Demzufolge wiesen die SunPatiens dünnere Blätter auf. Widersprüchlich ist dies zu den lichtmikroskopischen Aufnahmen, deren Vermessungen dickere Blätter bei den SunPatiens ergaben. Demnach stimmte die mikroskopische Vermessung der Blattdicke nicht mit der spezifischen Blattfläche überein. Messwiederholungen bestätigen, dass eine unschattierte Anzucht innerhalb der Sorte zu einer signifikant geringeren spezifischen Blattfläche führte (Anhang 2). Die spezifische Blattfläche mit den aufwändigen lichtmikroskopischen Untersuchungen zu vergleichen ist demnach nicht möglich, da es methodische Unterschiede gab. Für die spezifische Blattfläche wurden mit einem Korkbohrer Blattproben über die gesamte Blattfläche genommen und bei den lichtmikroskopischen Aufnahmen wurde nur der strahlungsexponierte Blattteil, also das erste Drittel von der Blattspitze aus beprobt.

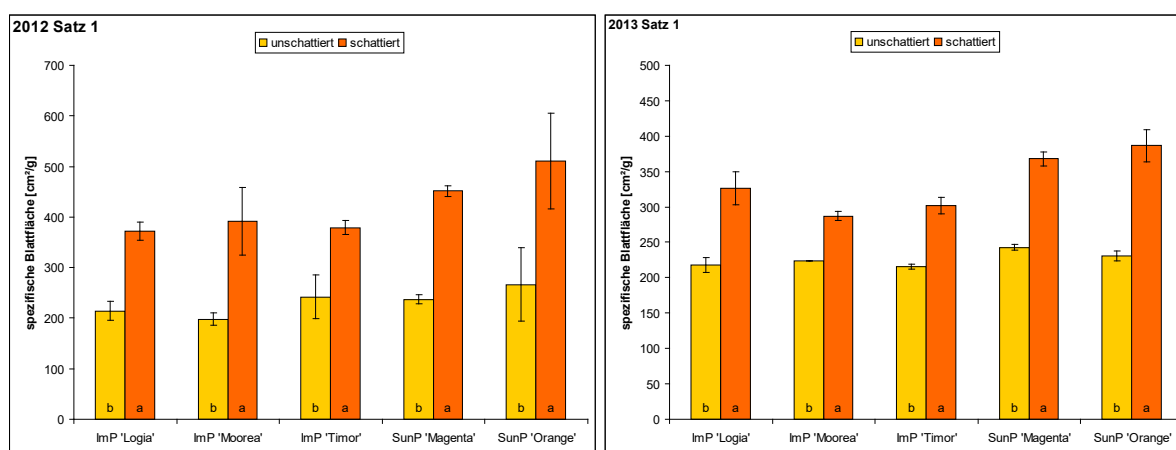


Abb. 55: Spezifische Blattfläche verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 30$)

Index der phänotypischen Plastizität

Der Index der phänotypischen Plastizität dient als Parameter dafür, wie schnell sich eine Pflanze an Bedingungen anpassen kann. In der vorliegenden Arbeit soll geprüft werden, ob sich eine Pflanze mit einer hohen phänotypischen Plastizität besser an die Bedingungen im Freiland anpassen kann und damit eine höhere Stresstoleranz besitzt als eine Pflanze mit einer geringen phänotypischen Plastizität. Um dies zu prüfen, wurde aus den anzuchtbedingten Merkmalen Schattenbildfläche, Kompaktheit, Blattdicke und spezifische Blattfläche der Index der phänotypischen Plastizität und der Index der mittleren phänotypischen Plastizität (MPP) ermittelt. Die mittlere phänotypische Plastizität wurde als Mittelwert aller Indizes berechnet und geht nach einer 10-wöchigen Anzucht für die Versuchsjahre 2012, 2013 und 2014 aus der Tab. 15 hervor.

Tab. 15: Index der phänotypischen und der mittleren phänotypischen Plastizität verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014

			Pflanzenparameter				MPP
			Schatten- bildfläche [cm ²]	Kompaktheit [Triebe/cm Pflanzenhöhe]	Blattdicke [µm]	Spezifische Blattfläche [cm ² /g]	
2012	Satz 1	ImP 'Logia'	0,04	0,27	0,17	0,42	0,23
		ImP 'Moorea'	0,04	0,21	0,14	0,49	0,22
		ImP 'Timor'	0,17	0,12	0,09	0,36	0,18
		SunP 'Magenta'	0,14	0,32	0,26	0,48	0,30
		SunP 'Orange'	0,22	0,28	0,23	0,48	0,30
	Satz 2	ImP 'Logia'	0,09	0,30		0,27	0,22
		ImP 'Moorea'	0,08	0,44		0,48	0,33
		ImP 'Timor'	0,02	0,16		0,44	0,21
		SunP 'Magenta'	0,13	0,31		0,39	0,27
		SunP 'Orange'	0,09	0,42		0,09	0,20
2013	Satz 1	ImP 'Logia'	0,02	0,15	0,09	0,33	0,15
		ImP 'Moorea'	0,02	0,23	0,13	0,22	0,15
		ImP 'Timor'	0,06	0,13	0,17	0,28	0,16
		SunP 'Magenta'	0,01	0,00	0,37	0,34	0,18
		SunP 'Orange'	0,04	0,06	0,32	0,40	0,21
	Satz 2	ImP 'Logia'	0,01	0,17		0,42	0,20
		ImP 'Moorea'	0,10	0,33		0,42	0,28
		ImP 'Timor'	0,16	0,17		0,41	0,25
		SunP 'Magenta'	0,13	0,23		0,48	0,28
		SunP 'Orange'	0,34	0,32		0,42	0,36
2014	Satz 1	ImP 'Logia'	0,09	0,10		0,48	0,22
		ImP 'Moorea'	0,01	0,09		0,50	0,20
		ImP 'Timor'	0,01	0,19		0,51	0,24
		SunP 'Magenta'	0,02	0,20		0,37	0,20
		SunP 'Orange'	0,11	0,03		0,47	0,20

Die in der Tab. 15 aufgezählten Daten veranschaulicht die Abb. 56. Dafür wurden die Ergebnisse innerhalb der Sorten und des Parameters der Versuchsjahre gemittelt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Merkmale Pflanzengröße, Kompaktheit und spezifische Blattfläche zwischen den Sorten und Arten nicht signifikant unterschieden haben. Lediglich die Blattdicke wies einen signifikanten Unterschied auf. Auch die mittlere phänotypische Plastizität unterschied sich zwischen den Sorten und Arten nicht. Dies bedeutet, dass sowohl die SunPatiens als auch die klassischen *Impatiens* gleichermaßen durch das verschiedene Strahlungsangebot in der Anzucht beeinflusst wurden. Es ist daher nicht eindeutig festzustellen, ob sich die SunPatiens oder die klassischen *Impatiens* stärker an Witterungsbedingungen anpassen können. Mögliche signifikante Unterschiede zwischen den Sorten wurden durch die Mittelung der Jahre verworfen oder die ausgewählten Merkmale für die Phänotypisierung des Pflanzenmaterials waren zu schwach differenziert.

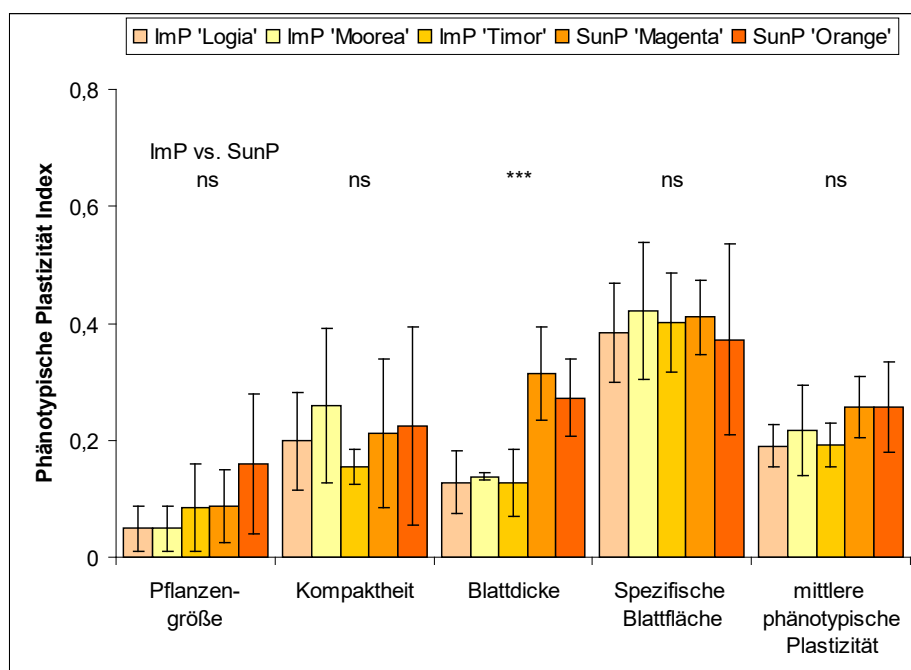


Abb. 56: Index der phänotypischen Plastizität und der mittleren phänotypischen Plastizität verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (ANOVA, $p < 0,05$, $n = 3-4$; ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

6.6.3 Anatomische Pflanzenmerkmale

Die erstellten lichtmikroskopischen Aufnahmen von Blattquerschnitten dienen nun im Folgenden der Klärung, ob anatomische Pflanzenmerkmale vor der Stressapplikation eine Identifizierung von Strahlungstoleranz zulassen. Abb. 57 zeigt am Beispiel der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' die Blattquerschnitte nach 10 Wochen Anzucht unter

verschiedenem Strahlungsangebot. Es ist zu erkennen, dass eine unschattierte Anzucht bei beiden Sorten zu dickeren Blättern führte, als eine schattierte Anzucht. Ein Einfluss des höheren Wasserangebotes in der Anzucht ist nicht auszuschließen. Dennoch zeigte die Sorte ImP 'Logia' nach einer unschattierten Anzucht Ansätze eines zweischichtigen Palisadenparenchyms. Die Palisaden der Sorte SunP 'Magenta' waren hingegen fast doppelt so lang, wie nach einer schattierten Anzucht. Beide Eigenschaften führen zu der Annahme, dass sich die Anzahl der Chloroplasten erhöht hat, wodurch die Pflanzen eine höhere Photosyntheserate besitzen sollten. Die höhere Anzahl an Chloroplasten wird zudem durch die schwächere Rosafärbung der Chloroplasten nach schattierter Anzucht bestätigt. Unterschiede in der Struktur der oberen Epidermis wurden nicht festgestellt.

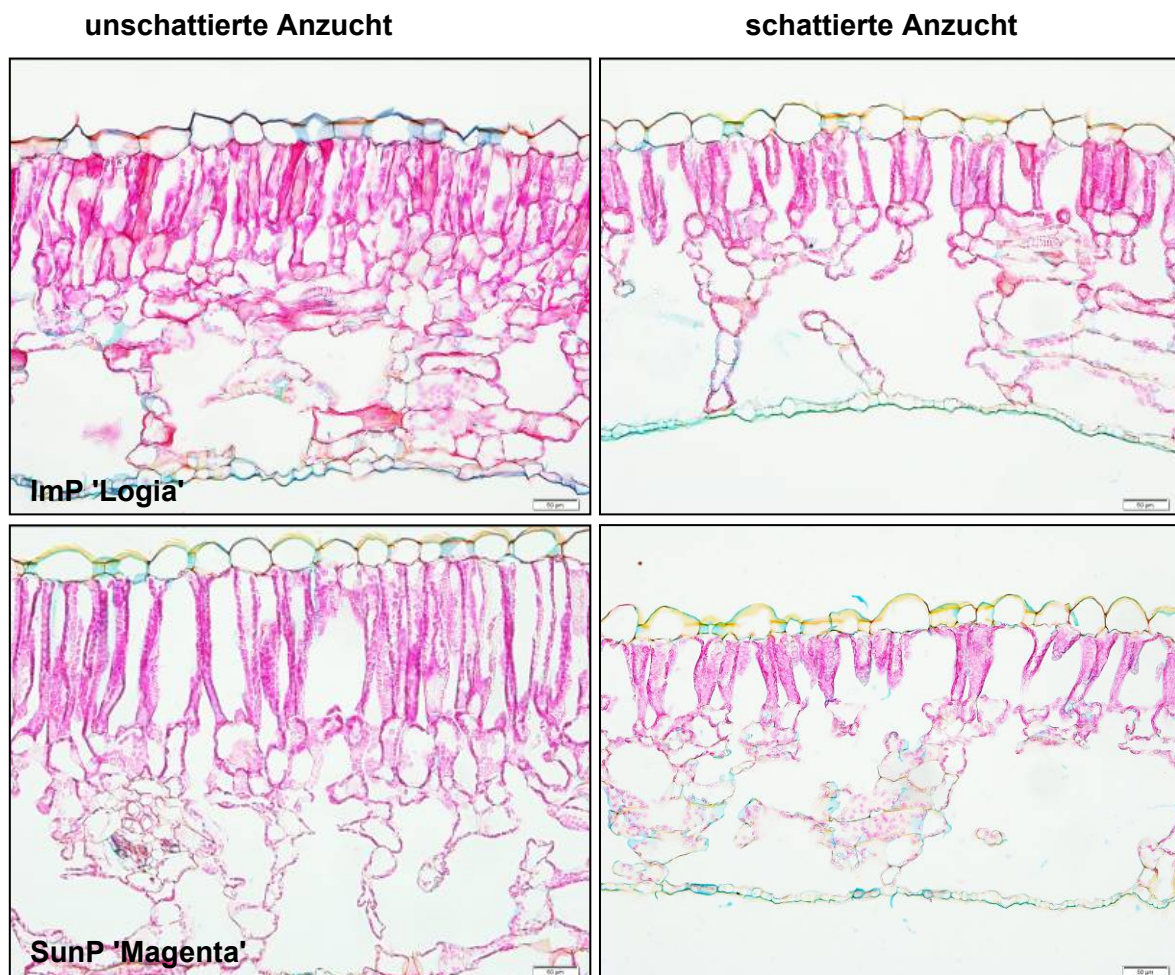


Abb. 57: Blattquerschnitte der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot im Versuchsjahr 2013 (Maßstab = 50 µm)

6.6.4 Physiologische Pflanzenmerkmale

Die lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate einer Pflanze zeigt ihre maximale photosynthetische Aktivität an. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate mit dem GFS 3000 erstellt. Damit sollte geprüft werden, ob eine 10-wöchige Anzucht unter unterschiedlichem Strahlungsangebot die Photosyntheserate beeinflussen kann. Abb. 58 zeigt diese Sättigungskurven am Beispiel der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach einer unschattierten und schattierten Anzucht aus den Versuchsjahren 2012 und 2014. Im Versuchsjahr 2012 verlief die Photosyntheserate der Sorte SunP 'Magenta' nach unschattierter Anzucht auf einem sehr hohen Niveau. Darunter verlief die Kurve der Sorte SunP 'Magenta' nach schattierter Anzucht. Es war demnach ein signifikanter Effekt der Anzucht zu erkennen. Zudem ähneln beide Kurven denen, die typische Sonnen- und Schattenpflanzen aufweisen. Die Kurven der Sorte ImP 'Logia' verliefen nahe dem Niveau der Sorte SunP 'Magenta' nach schattierter Anzucht. Jedoch ist auch hier ein signifikanter Effekt der Anzuchtvariante zu erkennen. Ein widersprüchliches Ergebnis wurde im Versuchsjahr 2014 erzielt. Die Sorte ImP 'Logia' aus unschattierter Anzucht zeigte ein weit höheres Niveau als die Sorte SunP 'Magenta' nach unschattierter Anzucht. Ein Effekt der Anzuchtbedingungen wurde jedoch auch in diesen Untersuchungen deutlich. Widersprüchliche Ergebnisse zeigten auch die Untersuchungen im Versuchsjahr 2013 (Anhang). In den meisten Untersuchungen lag aber ein signifikanter und systematischer Effekt der Anzuchtvarianten vor. Daraus wird gefolgert, dass eine unschattierte Anzucht zu Pflanzen mit einer höheren Photosyntheseleistung führt, als eine schattierte Anzucht.

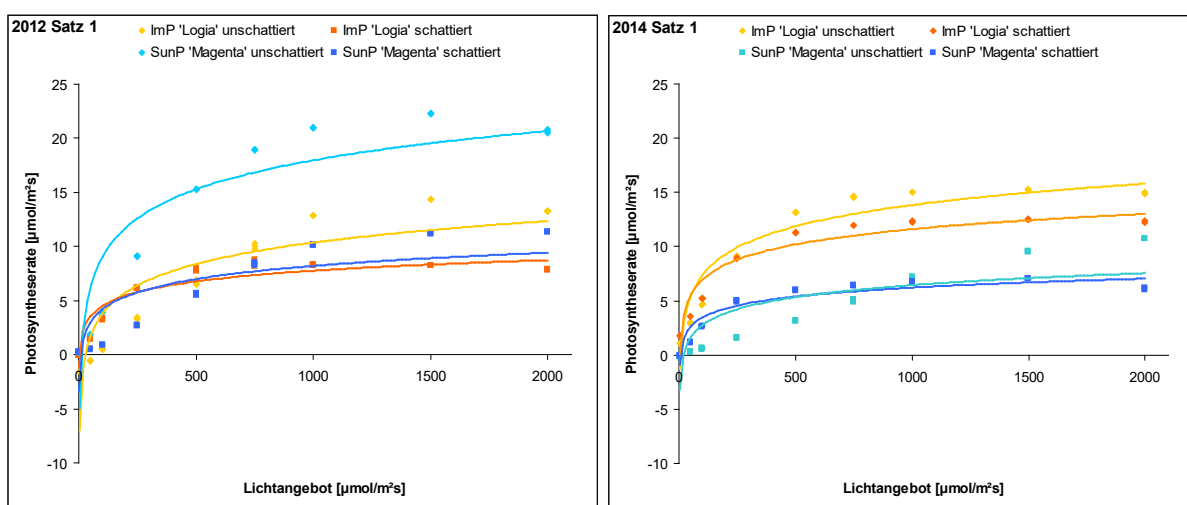


Abb. 58: Lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot

6.6.5 Diskussion und Zusammenfassung

Unschattierte und schattierte Anzuchtbedingungen beeinflussen *Impatiens*-Genotypen morphologisch, anatomisch und physiologisch signifikant. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich dies in signifikant kompakteren Pflanzen mit signifikant dickeren Blättern nach einer ungeschattierten Anzucht. Die größere Blattdicke wurde auf eine Zunahme des Palisadenparenchyms und des Schwammparenchym zurückgeführt. Unterschiede im Gehalt an Chloroplasten wurden nicht erfasst, sind aber durch die Zunahme des Palisadenparenchyms nicht auszuschließen. Zudem bestätigten lichtabhängige Photosyntheseraten nach ungeschatteter Anzucht eine höhere Aktivität. Diese signifikanten Unterschiede zwischen ungeschatteter und geschatteter angezogenen Pflanzen waren jedoch zum Teil kein nachhaltiger Effekt, da dieser je nach Sorte und auch je nach Versuchssatz variierte.

Die Berechnung des Index der phänotypischen Plastizität erbrachte nur wenig Erkenntnis. Bei einem Index zwischen 0 und 1 wird angenommen, dass Pflanzen mit einem Index nahe 1 eine hohe Fähigkeit besitzen sich an Umweltbedingungen anzupassen. Bei den getesteten Genotypen lagen die Indizes hingegen im unteren Niveau. Dabei wurde das Merkmal Schattenbildfläche nur sehr gering beeinflusst. Auf den Parameter der spezifischen Blattfläche reagierten die Pflanzen am stärksten. Der Index der mittleren phänotypischen Plastizität zeigte keine signifikanten Unterschiede. Es gilt daher zu klären, ob sich die phänotypische Plastizität überhaupt als Parameter für eine mögliche Strahlungstoleranz eignet und ob die ausgewählten Pflanzenparameter für die Berechnung der phänotypischen Plastizität geeignet waren. Zu beachten ist jedoch, dass die anatomischen und physiologischen Unterschiede bei der Berechnung der Indizes nicht berücksichtigt werden konnten, da es sich hier nicht um eine quantitative, sondern um eine qualitative Bewertung handelte. Hinzu kam, dass in der vorliegenden Arbeit die Stressapplikation als ein abruptes Ereignis simuliert wurde und die Pflanzen daher auch nur wenig Gelegenheit hatten, sich an die Bedingungen anzupassen, bzw. sich in der Anzucht schon an Freilandbedingungen angepasst haben.

Zusammenfassend wurden die Morphologie, Anatomie und die Physiologie der Pflanzen durch eine ungeschattete Anzucht signifikant positiv beeinflusst. Zu untersuchen ist nun, ob dies in Zusammenhang mit den morphologischen Stressreaktionen auf dem Prüfstand steht.

6.7 Einfluss anzuchtbedingter Merkmalsausprägungen von *Impatiens*-Genotypen auf die Intensität von Strahlungsstressreaktionen

Zwischen den Anzuchtbedingungen und vereinzelt auch zwischen den Sorten war in den Untersuchungen im Freiland eine unterschiedliche Stresstoleranz festzustellen. Im folgenden Kapitel wird nun untersucht, ob die bei den Genotypen identifizierten und durch das Strahlungsangebot in der Anzucht modifizierten morphologischen Merkmale mögliche Mechanismen einer unterschiedlichen Stresstoleranz sind.

6.7.1 Morphologische Pflanzenmerkmale vs. Strahlungsstressreaktionen

Um Pflanzenmerkmale und Stressreaktionen in Beziehung zu setzen, wurden nur die anzuchtbedingten Merkmale wie Schattenbildfläche, Kompaktheit, spezifische Blattfläche und Blattdicke mit dem Auftreten der Strahlungsstressreaktionen in Form von blattoberseitigen Nekrosen bewertet. Angewendet wurde dafür die Spearman Rangkorrelation, da die anzuchtbedingten Merkmale metrisch und die Nekrosenintensität ordinal erfasst wurden. Somit wurden aus 5 Versuchssätzen mit unschattierter und schattierter Anzucht 10 Daten miteinander verglichen und dargestellt. Zur Darstellung des Effektes der Anzucht wurden die Daten sortenspezifisch gemittelt und dargestellt.

Schattenbildfläche vs. Strahlungsstressreaktionen

Die Beziehung zwischen Schattenbildfläche und Strahlungsstressreaktionen geht aus der Abb. 59 hervor. Im Mittel der 5 Versuchssätze lag die Schattenbildfläche aller fünf Sorten nach unschattierter und schattierter Anzucht auf einem gleich hohen Niveau. Lediglich durch die Sorte SunP 'Magenta' ist nach schattierter Anzucht die Tendenz einer Beziehung zwischen den beiden Merkmalen zu erkennen. Unabhängig von den Anzuchtbedingungen, lag jedoch ein Sorteneffekt vor. Bestätigt wurde dies durch die Darstellung und Berechnung der Spearman Rangkorrelation über beide Anzuchtbedingungen innerhalb der einzelnen Sorten. Es ist deutlich zu erkennen, dass nur bei der Sorte SunP 'Magenta' ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Schattenbildfläche und der Intensität von Nekrosen beobachtet werden konnte. Für die Sorten ImP 'Logia', ImP 'Moorea', ImP 'Timor' und SunP 'Orange' konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Dies verdeutlicht, dass Strahlungsstressreaktionen unabhängig von dem anzuchtbedingten Merkmal Schattenbildfläche auftraten und sich somit dieses Merkmal nicht zur Identifizierung von strahlungsstresstoleranten Sorten eignet. Die Hypothese, dass kleinere Pflanzen eine höhere Stresstoleranz aufweisen, kann somit nicht bestätigt werden.

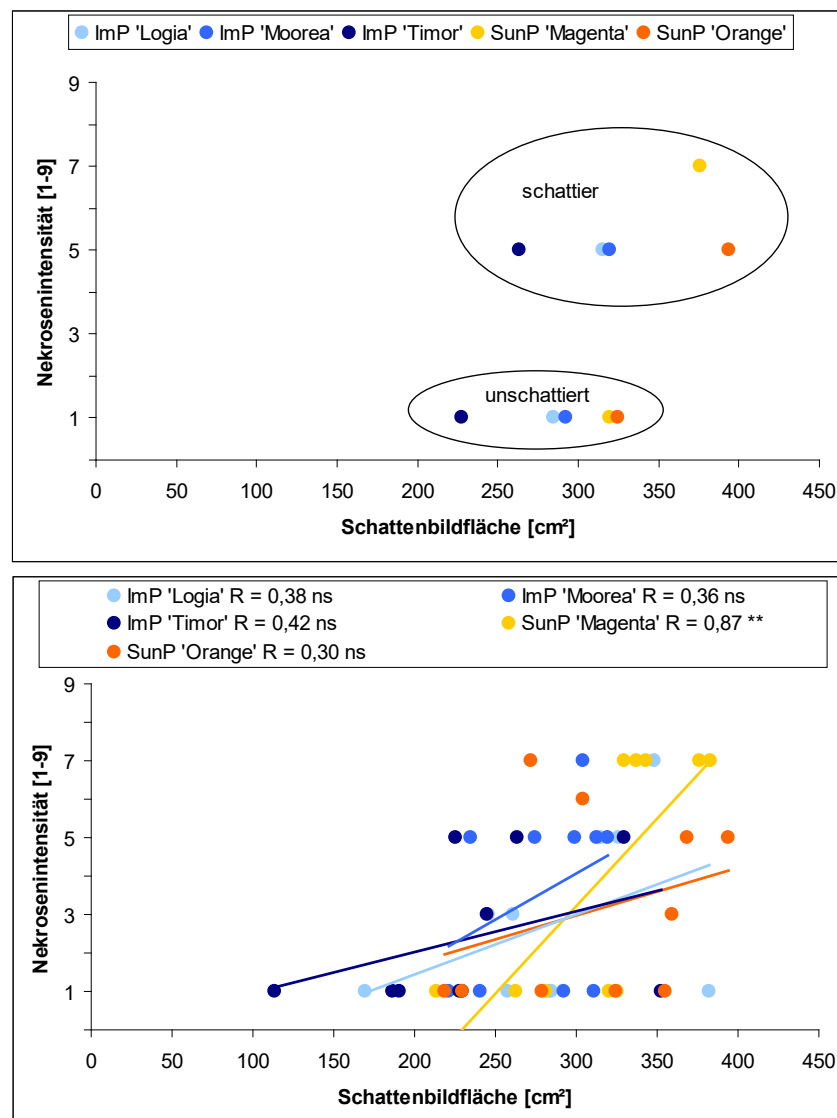


Abb. 59: Beziehungen zwischen Schattenbildfläche und Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Sorten nach verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

Kompaktheit vs. Strahlungsstressreaktionen

Ein ebenfalls zu prüfendes Pflanzenmerkmal ist die Kompaktheit. Die Abb. 60 zeigt die Beziehung zwischen der Kompaktheit und dem Auftreten von oberseitigen Blattnekrosen. Unabhängig von der Sorte ist zu erkennen, dass nach einer ungeschattierten Anzucht kein signifikanter Zusammenhang festzustellen war. Nach schattierter Anzucht war lediglich eine leichte Tendenz zu erkennen, wobei ungeschatterte Pflanzen mit gleicher Kompaktheit symptomfrei blieben. Sortenspezifische Unterschiede konnten nur durch die Rangkorrelation nach Spearman bestätigt werden. Bei den Sorten ImP 'Logia', ImP 'Moorea' und SunP 'Orange' war ein negativer Zusammenhang zwischen der Kompaktheit und dem Auftreten von Strahlungsstressreaktionen zu erkennen. Bei den Sorten ImP 'Timor' und SunP

'Magenta' lag jedoch kein signifikanter Zusammenhang vor. Daher kann die Hypothese, dass kompaktere Pflanzen eine bessere Strahlungsstresstoleranz aufweisen, nur bedingt bestätigt werden.

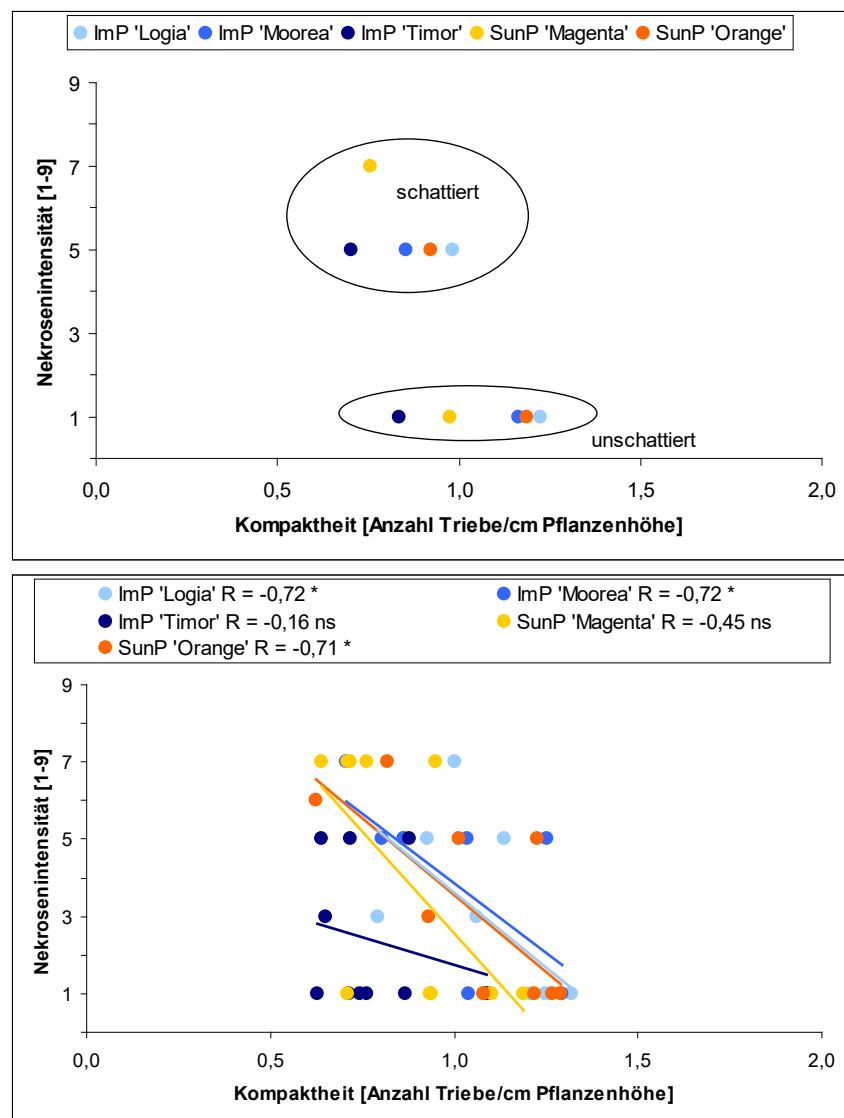


Abb. 60: Beziehungen zwischen Kompaktheit und Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, * = $P < 0,001$)**

Spezifische Blattfläche vs. Strahlungsstressreaktionen

Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Blattfläche als Maß für die Blattdicke und dem Auftreten von Strahlungsstressreaktionen geht aus der Abb. 61 hervor. Geprüft wird die Hypothese, dass strahlungsstresstolerante Sorten eine geringe spezifische Blattfläche aufweisen. Ebenso wie bei den zuvor geschilderten anzuuchtbedingten Merkmalen gab es

nach einer unschattierten Anzucht keine Strahlungsstressreaktionen und somit wurde auch kein Zusammenhang festgestellt. Lediglich nach einer schattierten Anzucht war eine Tendenz zu erkennen. Diese Tendenz wird durch die Betrachtung der einzelnen Sorten innerhalb der Anzuchtvarianten bestätigt. Bei den Sorten ImP 'Logia', ImP 'Timor' und SunP 'Magenta' lag ein signifikanter Zusammenhang zwischen der spezifischen Blattfläche und dem Auftreten von Strahlungsstressreaktionen vor. Als Indikator für strahlungsstresstolerante Sorten kann das Merkmal spezifische Blattfläche jedoch nicht in Betracht gezogen werden, da auch hier nicht bei allen Sorten ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden konnte. Die eingangs genannte Hypothese wird demnach nicht bestätigt.

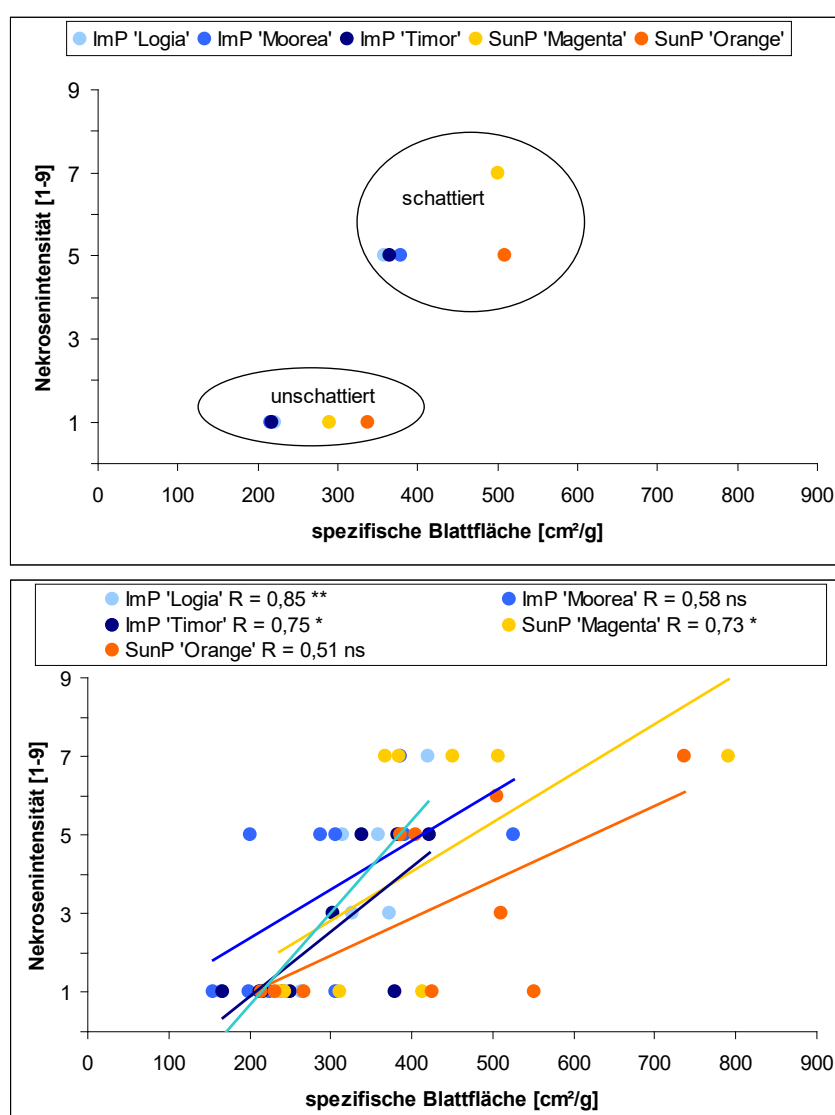


Abb. 61: Beziehungen zwischen spezifischer Blattfläche und Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (oben) und innerhalb der Sorten (unten) (Spearman, $p < 0,05$, $n = 10$, ns = nicht signifikant, * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$)

Blattdicke vs. Strahlungstressreaktionen

Als letztes anzuchtbedingtes Merkmal wurde die lichtmikroskopische Blattdicke in Beziehung zum Auftreten der Strahlungstressreaktionen gesetzt. Aus der Abb. 62 geht der Vergleich zwischen der Blattdicke einer unschattierten und einer schattierten Anzucht und das Auftreten der Strahlungstressreaktionen aus 2 Versuchssätzen hervor. Da die Anzahl der Daten zu gering war, ist kein anzuchtunabhängiger Vergleich innerhalb der Sorte möglich. Trotz dessen ist deutlich zu erkennen, dass unabhängig von der Blattdicke die Pflanzen nach einer unschattierten Anzucht symptomfrei blieben. Die Blattdicke der schattiert angezogenen Pflanzen lassen vermuten, dass die Dicke der Blätter einen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber Strahlungstress hatte. Innerhalb der Sorten zeigt sich, dass dickere Blätter zu strahlungsstresstoleranteren Pflanzen geführt haben. Eine statistisch gesicherte Aussage ist jedoch auf Grund der geringen Datenmenge nicht möglich. Damit wird das Merkmal Blattdicke auch nur bedingt als Indikator für die Früherkennung einer möglichen Strahlungsstresstoleranz angesehen. Somit wird die Hypothese, dass strahlungsstresstolerante Pflanzen dickere Blätter aufweisen, nur bedingt angenommen.

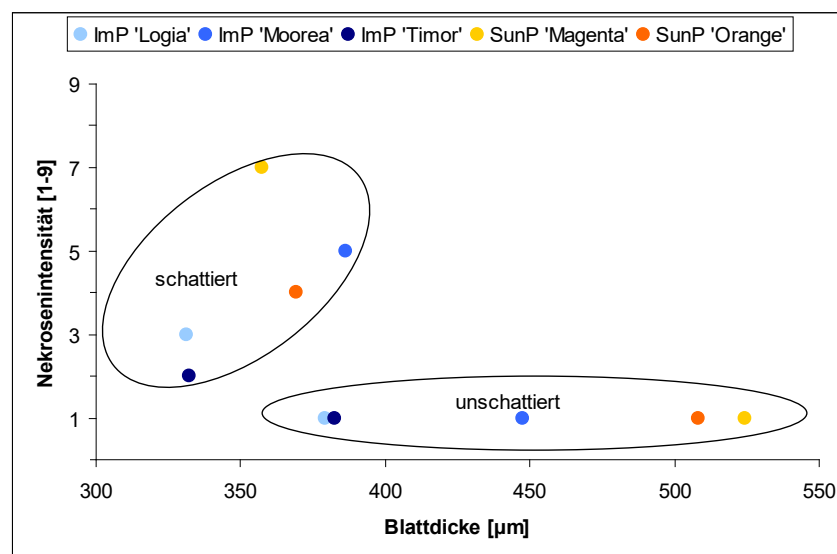


Abb. 62: Beziehungen zwischen Blattdicke und Nekrosenintensität verschiedener *Impatiens*-Sorten unter verschiedenem Strahlungsangebot über 5 Versuchssätze (n = 2)

6.7.2 Diskussion und Zusammenfassung

Die anzuchtbedingten Merkmale Schattenbildfläche, Kompaktheit, spezifische Blattfläche und Blattdicke zeigten einen nur bedingten, und innerhalb der Sorten, unsystematischen Zusammenhang zum Auftreten der Strahlungstressreaktionen in Form blattoberseitiger Nekrosen. Deutlich wurde jedoch, dass unabhängig vom erfassten Merkmal eine

unschattierte Anzucht zu symptomfreien Pflanzen geführt hat. Nach einer schattierten Anzucht gab es nur leichte Tendenzen eines möglichen Zusammenhanges. Aussagekräftiger waren hingegen die anzuchtunabhängigen Vergleiche innerhalb der Sorten. Diese Zusammenhänge waren jedoch nicht bei allen Sorten systematisch. Damit ist deutlich gemacht worden, dass keines der erfassten anzuchtbedingten Merkmale für eine Früherkennung der Strahlungsstresstoleranz in Frage kommen kann.

7. Diskussion

An *Impatiens* Neuguinea werden kurze Zeit nach dem Auspflanzen ins Freiland an sonnigen Standorten nach heißen und niederschlagsarmen Perioden Blattverbrennungen beobachtet, die den Zierwert der Pflanzen erheblich mindern. Grund für ihre Sensitivität ist, dass *Impatiens* sehr empfindlich auf Trockenheit (ERNST 2009) und hohe Einstrahlung (LANGKAMP & SPINAROVA 2014) reagieren. Es kommt folglich zu oberseitigen Blattverbrennungen. Diese oberseitigen Blattverbrennungen können auf Stressreaktionen in der Pflanze zurückgeführt werden, bei denen die Ausbildung von Sauerstoffradikalen (ROS) eine zentrale Rolle spielt. Dieser, in der Literatur vielfach beschriebener, oxidative Stress verursacht Membranläsionen (ARORA et al. 2002; MCKERSIE 1996; MITTLER 2002), welche sich im weiteren Verlauf als nekrotisiertes Blattgewebe äußert (CEN & BORNMAN 1990; WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013).

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen durchgeführt. Ziel war es, einen Prüfstand zur Untersuchung der Strahlungsstresstoleranz im Freiland zu entwickeln. Neben drei vermeintlich empfindlichen Genotypen wurden auch zwei Genotypen aus einer Neuzüchtung mit dem Trivialnamen SunPatians getestet. Die Untersuchungen wurden an die folgenden Arbeitshypothesen angelehnt:

- SunPatians sind strahlungsstresstoleranter als die klassischen *Impatiens* Neuguinea
- Stresstoleranz wird durch die Anzuchtbedingungen modifiziert
- Strahlungsstresstolerante Genotypen haben einen kompakteren Pflanzenaufbau, eine geringere spezifische Blattfläche somit dickere Blätter und eine höhere phänotypische Plastizität
- Strahlungsstresstolerante Genotypen haben eine bessere Regelung des Wasser- und Wärmehaushaltes

Begleitende morphologische, anatomische und physiologische Untersuchungen wurden zur Identifizierung einer Strahlungsstresstoleranz herangezogen. Die dargestellten Arbeitshypothesen werden mit den erfassten Ergebnissen dieser Untersuchungen im folgenden Kapitel aufgegriffen und diskutiert. Vorangestellt ist jedoch ein Unterkapitel, in dem der verwendete Freilandprüfstand diskutiert wird.

7.1 Möglichkeiten und Grenzen von Freilandprüfständen zur Untersuchung der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens*-Genotypen

Freilandprüfstände sind der Witterung ausgesetzt und weisen demzufolge oft unkontrollierbare Bedingungen auf. Zur Schaffung reproduzierbarer Bedingungen werden Untersuchungen über klimatische Wachstumsfaktoren daher oft in Klimakammern durchgeführt (ANYIA & HERZOG 2004; BASIOUNY et al. 1978; KAKANI et al. 2003; ZHANG et al. 2012). Die Erzeugung freilandähnlicher Bedingungen in Klimakammern ist jedoch nur mit hohem technischem Aufwand und demzufolge mit hohen Investitions- und Energiekosten möglich. Versuche in Klimakammern sind jedoch nicht nur kostenintensiv, sie können auch zu falschen Schlussfolgerungen führen (BALLARE 2003).

Nach BALLARE (2003) haben Versuche mit einer erhöhten UV-B Konzentration durch monochromatische UV-B Quellen gezeigt, dass das Strahlungsverhältnis nicht in Balance ist und die Ergebnisse aus diesen Klimakammerversuchen nicht die Erkenntnisse aus Freilandversuchen widerspiegeln können, was die Interpretation der Daten erschwert. In der vorliegenden Arbeit wurden in Klimakammern mit Tastversuchen versucht, Ansätze einer Strahlungsstressapplikation mit einem Halogenstrahler zu simulieren. Die Pflanzen reagierten auf diese Bedingungen mit eingesunkenem Interkostalbereich der Blätter (Abb. 24). Die Reaktionen der Pflanzen in diesen Tastversuchen ähnelten eher einer Plasmolyse durch Hitzestress, als den Strahlungsstressreaktionen, die im Freiland beobachtet wurden. Die Aussagen von BALLARE (2003) über nicht repräsentative Stressbedingungen aus Klimakammerversuchen wurden damit bestätigt. Um verwertbare Erkenntnisse über Strahlungsstressreaktionen von *Impatiens*-Genotypen zu gewinnen, fanden daher alle Untersuchungen der vorliegenden Arbeit unter Freilandbedingungen statt.

Versuche unter Freilandbedingungen haben jedoch das Manko, dass Szenarien eines möglichen Klimawandels nicht simuliert werden können. Dafür können sensitive Pflanzen, wie in der vorliegenden Arbeit, auf die aktuellen Bedingungen getestet werden. Herausforderungen eines Freilandprüfstandes zeigten sich dabei in der Standardisierung eines Prüfprotokolls und in der Interpretation von multiplen Stressreaktionen. Damit ist unter anderem der Temperatureffekt unter den eingesetzten Foliendächern, die Wechselwirkung zwischen Strahlungsstress und Trockenstress und die Bestimmung geeigneter Pflanzgefäße gemeint.

Auf dem im Kapitel 5.3.1.3 beschriebenen Prüfstand wurden die von SCHULZE et al. (2005) genannten multiplen Stressreaktionen durch mehrere Stressoren und/oder durch den Einfluss von einem Stressor auf mehrere metabolische Prozesse schnell deutlich. Auffällig wurde dies durch die Pflanzen der beiden Varianten Kontrolle und UV-B Stress. Diese

befanden sich während der Stressapplikation unter einem Foliendach, deren Lufttemperatur mit fast 10 K über der Lufttemperatur im Freiland lag (Abb. 21). Aus technischen Gründen konnte dieser Zustand nicht verhindert werden, da weder eine Lüftung am höchsten Punkt des Daches noch eine Abfuhr der Luft durch Ventilatoren sichergestellt werden konnte. Zudem hätte dies die Transpiration der Pflanzen durch die Brechung der Grenzschicht der Blätter erhöht und damit die Pflanzenphysiologie noch stärker beeinflusst (ALBERT 2008; WEILER & NOVER 2008), was eine Interpretation der Daten zusätzlich erschwert hätte. Es fand daher keine Veränderung des Prüfstandes statt.

Eine weitere Herausforderung war die Gestaltung der Variante Kombi-Stress, da die Stressapplikation dieser Pflanzen erst mit einer leichten Welke beginnen sollte, um die Reaktionen von trocken gestressten Pflanzen unter Strahlungstress zu verdeutlichen. Jedoch konnte das nicht bei allen fünf durchgeführten Versuchssätzen umgesetzt werden, da die Witterungsbedingungen im Freiland oft schnelles Handeln vorbestimmt haben. Die Voraussetzung eines bis zu sieben Tage anhaltenden Hochdruckgebietes mit sommerlichen Temperaturen ohne Niederschlag war vor allem im Versuchsjahr 2013 Satz 1 nur in einem sehr kurzen Zeitfenster gegeben. Daher war die Welke der Pflanzen nicht so stark ausgeprägt (Abb. 29), wie in den anderen Versuchssätzen.

Bei der Gestaltung des Freilandprüfstandes erwiesen sich die eingesetzten Pflanzgefäße als sehr positiv. Es wurden handelsübliche Balkonkästen mit einem Wasserreservoir verwendet. Durch dieses Wasserreservoir konnte sichergestellt werden, dass bei den Varianten ohne Trockenstress eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet wurde. Über Dochte, mit denen das Substrat mit dem Wasserreservoir verbunden war, fand eine kontinuierliche Nachlieferung statt. Ebenso gelang es mit den Pflanzgefäßen eine gleichmäßige Austrocknung des Substrates der Varianten unter Trockenstress herbeizuführen. Tastversuche mit Pflanzen im 11er Topf zeigten, dass auf Grund des kleineren Topfvolumens, eine schnellere und unkontrollierbare Austrocknung des Substrates und damit auch eine gestörte Wasserversorgung der Pflanzen während der Stressapplikation vorlag und zu vermeiden ist.

Unkontrollierbare und teilweise unvorhersehbare Witterungsbedingungen im Freiland erschwerten die Arbeiten und die Umsetzung der vier standardisierten Prüfvarianten. Ein Verzicht auf Freilandprüfstände kam jedoch nicht in Frage. Die vorliegende Arbeit zeigte, dass Freilandversuche demnach immer zur Evaluierung von Versuchen aus Klimakammern dienen. Ohne diese Freilandversuche und die dazu gehörige detaillierte Beschreibung von Strahlungstressreaktionen würden sonst womöglich die in der Arbeit in den Klimakammern beobachteten Stressreaktionen fälschlicherweise als Strahlungstressreaktionen interpretiert worden sein.

7.2 Spezifische Strahlungsstressreaktionen verschiedener *Impatiens*-Genotypen und ihre Entstehung unter Freilandbedingungen

Einer der Schwerpunkte der Arbeit bestand darin, Methoden zu entwickeln, um *Impatiens*-Genotypen auf ihre Strahlungsstresstoleranz zu testen. Hierzu wurden fünf verschiedene *Impatiens*-Genotypen, nach Sensibilisierung durch eine schattierte Anzucht, auf dem im Kapitel 5.3.1.3 beschriebenen Prüfstand aufgestellt. Täglich wurden die Pflanzen beobachtet und nach einem Boniturschema bewertet. Nach wenigen Tagen unter hohem Strahlungsangebot bei hohen mittleren Tagestemperaturen ohne Niederschlag wurden Blattnekrosen beobachtet. Es wurde deutlich, dass sich die Färbung und die Form der Nekrosen genotypisch unterschiedlich ausprägen. Die Sorte ImP 'Logia' wies hellbraune bis dunkelbraune Aufhellungen auf (Abb. 26). Die Sorte SunP 'Magenta' zeigte eher weißliche Aufhellungen (Abb. 27), von denen erst nur Punkte zu erkennen waren, die sich im Verlauf eines Tages großflächig über das Blatt erstreckten. Bei beiden Sorten waren diese Aufhellungen irreversible Reaktionen, die auf ein hohes Strahlungsangebot zurückgeführt werden, da diese Reaktionen nur an Blättern beobachtet wurden, die der direkten Strahlung ausgesetzt waren.

Unterschiede in den Reaktionen traten jedoch nicht nur in der Form und Farbe der Nekrosen auf, sondern auch in der Intensität (Abb. 28 und Abb. 29). Die Pflanzen der Variante Kontrolle blieben auch nach sieben Tagen symptomfrei. Die Pflanzen der Variante Strahlungsstress und Kombi-Stress zeigten hingegen deutliche Nekrosen bis zur Note 7, was eine nekrotisierte Pflanzenfläche von bis zu 50 % bedeutet. Auffällig war dabei die Sorte ImP 'Timor', die zwar auch nach wenigen Tagen nekrotische Blätter aufwies, jedoch war deren Intensität nicht so stark ausgebildet, wie bei den anderen Sorten. Die Sorte SunP 'Magenta' hingegen zeigte häufig schon nach einem Tag unter Strahlungsstress und Kombi-Stress Blattaufhellungen und schnitt nach sieben Tagen schlechter ab, als die anderen Sorten. Die Tab. 13 zeigt einen Vergleich der SunPatiens zu den klassischen *Impatiens* in ihrer Nekrosenintensität. Dabei wurden die Pflanzen der SunPatiens signifikant höher geschädigt, als die Pflanzen der klassischen *Impatiens*. In der Variante Kombi-Stress trat dies sogar in vier von fünf Versuchen auf. Zusammenfassend bedeutet dies, dass in den ersten sieben Tagen der Überführung der Pflanzen von einem stark schattierten Gewächshaus ins Freiland die SunPatiens empfindlicher reagierten, als die klassischen *Impatiens*. Die Arbeitshypothese, dass SunPatiens strahlungsstresstoleranter sind als die klassischen *Impatiens*, kann damit nicht belegt werden.

Mögliche Gründe für das unterschiedliche Verhalten der klassischen *Impatiens*-Genotypen und den SunPatiens in der Herkunft der Pflanzen zu suchen ist schwierig. Bekannt ist, dass die Eltern der *Impatiens* Neuguinea von der Inselregion Neuguinea stammen (BENJAMIN

1990). Daraus ist abzuleiten, dass *Impatiens* Neuguinea genotypisch an warme und tropische Klimaregionen angepasst sind, was die Kälte- und Trockenstressempfindlichkeit der Pflanzen begründet. Zudem ist die Region stark bewaldet, was ihre Empfindlichkeit gegenüber hoher Strahlungsintensität erklärt. Ungeklärt ist jedoch die Herkunft der SunPatiens. Es ist lediglich bekannt, dass die SunPatiens mit indonesischen Wildarten gekreuzt wurden und dass es sich dabei um interspezifische *Impatiens* handelt (FISCHER-KLÜVER 2011). Weitere Herkunftsdetails der SunPatiens sind leider unbekannt. Demnach kann die Herkunft der klassischen *Impatiens* und der SunPatiens durchaus identisch sein, was das sehr ähnliche Verhalten beider Typen auf die sich abrupt geänderten Witterungsbedingungen begründen könnte, jedoch nicht, warum die SunPatiens in den ersten Tagen stärker reagiert haben als die klassischen *Impatiens*.

Um zu prüfen, ob spezifische Strahlungstressreaktionen anatomisch und physiologisch zu erkennen sind und wie Strahlungstressreaktionen entstehen, wurden Blattquerschnitte erstellt, sowie die Chlorophyll-Fluoreszenz der Pflanzen bestimmt. Es zeigte sich, dass spezifische Strahlungstressreaktionen zwischen den Genotypen auf der Ebene der Blattanatomie nur bedingt zu erkennen waren. Es waren bei allen Sorten zerstörte Zellen der oberen Epidermis und beeinträchtigte Zellen des Palisadenparenchyms mit denaturierten Chloroplasten zu erkennen (Abb. 31). Auffällig war jedoch, dass die Sorten ImP 'Moorea' und SunP 'Magenta' vereinzelt intakte Epidermiszellen zeigten. Dies lässt die Vermutung zu, dass Nekrosen nicht auf der Ebene der Epidermis entstehen, sondern einen tieferen Ursprung haben. Wie im Kapitel 2.4.2 beschrieben, entstehen Nekrosen durch eine erhöhte Konzentration von ROS, die Membranläsionen hervorrufen. ROS sind jedoch ein natürliches Nebenprodukt der Photosynthese (GRIMME 2006; ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004) und enzymatische Prozesse halten die Konzentration der ROS in den für die Zelleorganellen unschädlichen Bereich. Erhöhte Strahlungsintensitäten führen jedoch dazu, dass Pflanzen mehr Strahlungsenergie aufnehmen, als sie umsetzen können (ZIMMERMANN & ZENTGRAF 2004). Dies hat zur Folge, dass hohe Konzentrationen von ROS entstehen, die von der Zelle nicht mehr enzymatisch entgiftet werden können (MITTLER 2002). Nachfolgend destabilisieren ROS Zellmembranen und es entstehen Membranläsionen (CHOI et al. 2007; WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013). Es wird daher angenommen, da ROS ein natürliches Nebenprodukt bei der Photosynthese sind, dass zunächst die Membranen der Chloroplasten und des Palisadenparenchyms betroffen werden, ehe die Zellen der Epidermis geschädigt werden. Daher wurden in der vorliegenden Arbeit auch bei der Sorte SunP 'Magenta' trotz Schädigung noch intakte Zellen der Epidermis beobachtet. Demnach entstehen Nekrosen auf der Ebene des Palisadenparenchyms. Dies wird mit Untersuchungen von CEN und BORNMAN (1990), die Bohnen unter verschiedenen Strahlungsbedingungen kultiviert haben,

bestätigt. Dabei reagierten Bohnen in den Untersuchungen auf niedrige PAR und hohem UV-B Gehalt zunächst mit deformierten Zellen des Palisadengewebes.

Strahlungsstressreaktionen lassen sich somit anatomisch genau beschreiben, genotypische Unterschiede waren aber nicht festzustellen. Erwartungen wurden demzufolge in die Chlorophyll-Fluoreszenz gesetzt, da diese Methode direkt die maximale Quantenausbeute des PSII (F_v/F_m) erfasst. Dafür wurde in der vorliegenden Arbeit in den ersten vier Tagen der Stressapplikation der F_v/F_m -Index der Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' unter Strahlungsstress zur Kontrolle erfasst. Es zeigte sich, dass nach 24 h der F_v/F_m -Index unter das Niveau des Ausgangswertes abfiel und der Index beider Sorten unter Strahlungsstress signifikant unter das Niveau der Kontrolle fiel. In den Folgetagen stieg der Index beider Sorten ohne signifikanten Unterschied zwischen den Stressvarianten jedoch wieder an. Ein möglicher Zusammenhang könnte in der Bildung und Entgiftung von ROS liegen. Wie eingangs der Arbeit beschrieben, führt eine Absorption von hohen Strahlungsintensitäten zu einer erhöhten Bildung von ROS, welche in diesem Fall die maximale Quantenausbeute des PSII beeinflusst haben könnten. Eine Entgiftung dieser ROS und die damit verbundene Erholung nach 48 h kann durch das antioxidative Enzym Superoxiddismutase (SOD) erfolgt sein. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch der Gehalt an ROS und SOD nicht gemessen. Da die Chlorophyll-Fluoreszenz eine anerkannte Methode zur Identifizierung von Stressbedingungen ist, zeigen Untersuchungen von BURRITT und MACKENZIE (2003), die Sonnen- und Schattenpflanzen von Begonien in die Sonne aussetzten und dort signifikante Unterschiede in der Chlorophyll-Fluoreszenz beobachten konnten. Auf eine Beeinträchtigung des Zierwertes durch einen Abfall des F_v/F_m -Indizes geht die Untersuchung jedoch nicht ein. Zudem zeigten Untersuchungen von SANUSI et al. (2011), dass Geweihfarne unter hoher Einstrahlung mit einem signifikant geringeren F_v/F_m -Index reagierten. Ebenso wurde an Erdbeeren ein Einfluss von UV-B-Strahlung auf die Chlorophyll-Fluoreszenz festgestellt (HEIJARI et al. 2006). Die Chlorophyll-Fluoreszenz kann daher zur Identifizierung von Strahlungsstressbedingungen angewendet werden.

Zusammenfassend äußerten sich in der vorliegenden Arbeit Strahlungsstressreaktionen an *Impatiens* als Nekrosen, die sich durch kollabierte Epidermiszellen, beeinträchtigtes Palisadenparenchym und denaturierte Chloroplasten auszeichneten. Nekrosen konnten somit als Reaktionen auf Strahlungsstress eindeutig anhand von blattanatomischen Untersuchungen festgestellt werden. Auch konnte daraus abgeleitet werden, dass Chloroplasten als Entstehungsort dieser Nekrosen in Frage kommen. Die Arbeitshypothese, dass SunPatiens strahlungsstresstoleranter sind als die klassischen *Impatiens*, konnte anhand der Bonitur der Nekrosenintensität jedoch nicht bestätigt werden, da die SunPatiens stärker auf die Stressbedingungen reagiert haben als die klassischen *Impatiens*. Die

Chlorophyll-Fluoreszenz als anerkannte Methode zur Identifizierung von Strahlungsstressbedingungen konnte diese Aussage zwar nicht unterstützen, dennoch zeigten sensitive *Impatiens* nach 24 h in der Variante Strahlungsstress ein geringeres F_v/F_m -Verhältnis als Pflanzen in der Variante Kontrolle.

7.3 Differenzierung von Trocken- und Strahlungsstressreaktionen verschiedener *Impatiens*-Genotypen unter Freilandbedingungen

Die in der Literatur beschriebenen Reaktionen auf Trockenstress beginnen unter anderem mit einer erhöhten Konzentration des Signalstoffes ABA (BRUNOLD et al. 1996). Bedingt dadurch schließen sich die Stomata, um einen Wasserverlust durch Transpiration zu vermeiden (CHAVES et al. 2003). Die Blatttemperatur steigt an, da die natürliche Kühlung des Blattes, auf Grund der geschlossenen Stomata, eingestellt wird (LEINONEN & JONES 2004). Weitere Symptome sind Welke (HALLMANN et al. 2007) und an *Impatiens* wurde ein Einrollen der Blätter, die auf eine Minimierung der Transpirationsfläche zurückgeführt wird (KRATO 2012), beobachtet. Strahlungsstressreaktionen werden hingegen mit dem oxidativem Stress beschrieben und verglichen. Dabei führt überschüssige Strahlungsenergie dazu, dass die Konzentration an ROS steigt. Diese Radikale verursachen Membranläsionen und das PSII wird beschädigt (ARORA et al. 2002; MCKERSIE 1996; MITTLER 2002). Chlorotische und nekrotische Blattflecken an den zur Sonne exponierten Blättern sind die Folge (WITUSZYŃSKA & KARPIŃSKI 2013).

In der vorliegenden Arbeit wurde Welke als Reaktion auf Trockenstress und Nekrosen als Reaktion auf Strahlungsstress an verschiedenen *Impatiens*-Genotypen beobachtet. Dehydrierungsversuche zeigten, dass *Impatiens* auf Trockenstress mit einem Herabhängen der Blätter reagieren. Es wurde auch ein Einrollen der Blätter und ein Absenken der Triebspitze beobachtet. Zudem stieg die Blatttemperatur bei unter Trockenstress leidenden Pflanzen signifikant an (Abb. 35). Deutlich sichtbar und im Vergleich dazu unterschiedlich reagierten *Impatiens* auf Strahlungsstress. Wie bereits beschrieben, waren an zur Sonne exponierten Blättern blattoberseitige Nekrosen zu erkennen, die sich bei Blattüberlappungen vom gesunden Blattgewebe abgrenzten (Abb. 25). Die Sorte SunP 'Magenta' zeigte eher weißliche Nekrosen. Die Sorte ImP 'Logia' reagierte mit bräunlichen Nekrosen. Darüber hinaus wurden unter einem UV-durchlässigen Foliendach dieselben Reaktionen beobachtet wie unter der Variante Strahlungsstress, nur war die Nekrosenintensität etwas abgeschwächt. Es ist daher fraglich, ob die beobachteten Reaktionen im Freiland Reaktionen auf Globalstrahlung oder auf UV-Strahlung sind. Dennoch stimmen die in der Literatur beschriebenen Reaktionen auf Trocken- und Strahlungsstress somit mit den

Beobachtungen des Pflanzenmaterials in der vorliegenden Arbeit überein. Reaktionen auf Trocken- und Strahlungsstress verschiedener *Impatiens* lassen sich somit morphologisch deutlich voneinander trennen. Ob diese Differenzierung der Reaktionen auch auf physiologischer Ebene möglich ist, gilt es nun zu diskutieren.

Im Versuchsjahr 2012 zeigte sich bei verschiedenen *Impatiens* in der Variante Kombi-Stress eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit, als in der Variante Strahlungsstress (Abb. 32). Dies deutet darauf hin, dass die Stomata signifikant auf den Parameter Trockenstress reagierten. Im Versuchsjahr 2013 wurde die stomatäre Leitfähigkeit zwei Tage nach Stressbeginn gemessen. Dabei zeigte sich, dass der oben genannte Effekt zu diesem Zeitpunkt nicht bestätigt werden konnte (Abb. 33). Zudem wurde in dem Jahr auch die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen aus der Variante Kontrolle erfasst. Diese zeigten morphologisch keine Trocken- und Strahlungsstressreaktionen und sollten den Effekt der Variante Strahlungsstress physiologisch verdeutlichen. Statistisch gesehen zeigten die Pflanzen aus der Variante Kontrolle eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit als die Pflanzen aus den Varianten Strahlungsstress und Kombi-Stress, jedoch verglichen zum Versuchsjahr 2012 auf einem sehr geringen Niveau. Ein Effekt, der sich mit dem Stressmodel nach SELYE (1973) und LARCHER (2001) erklären lässt. Die Pflanzen befanden sich demnach in der Alarmphase. Das niedrige Niveau der stomatären Leitfähigkeit der Pflanzen der Variante Kontrolle ist jedoch damit nicht zu erklären, da diese weder einem Strahlungsstress noch einem Trockenstress ausgesetzt waren. Grund für das niedrige Niveau der stomatären Leitfähigkeit könnte in der höhere Lufttemperatur unter dem Foliendach liegen, was die Frage offen lässt, ob Pflanzen unter ungewohnt hoher Lufttemperatur ähnlich reagieren, wie Pflanzen unter Strahlungsstress.

Ähnliche Ergebnisse erbrachten nämlich auch der aus den Thermalbildern berechnete CWSI. Tastversuche zeigten, dass Pflanzen unter Trockenstress einen signifikant höheren Index aufwiesen und damit gestresster waren, als gut bewässerte Pflanzen (Abb. 35). Untersuchungen von JONES (1999b) zeigten, dass dieser Effekt auf eine geringere Weite der Stomata zurückzuführen ist. Diese Methode eignet sich somit auch für die Messung der stomatären Leitfähigkeit. KRATO (2012) fand bei ihren Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen eine signifikante Korrelation zwischen dem berechneten CWSI und der durch Gaswechselfmessungen erfassten stomatären Leitfähigkeit bei den Sorten ImP 'Moorea' und ImP 'Timor' zur Identifizierung trockenstresstoleranter *Impatiens* heraus. Auf Grund dieser Basis wurde die Thermographie in der vorliegenden Arbeit eingesetzt, um zu prüfen, ob sie zur Identifizierung von Strahlungsstress geeignet ist. Die Untersuchungen erbrachten, dass signifikante Unterschiede im CWSI zwischen den beiden Varianten Kontrolle und Strahlungsstress nur bedingt vorlagen (Abb. 36). Im Versuchsjahr 2014 waren die Pflanzen

der Variante Kontrolle signifikant gestresster, als die Pflanzen der Variante Strahlungstress, in den Versuchsjahren 2012 und 2013 trat zum Teil auch kein signifikanten Unterschied auf. Vor dem Hintergrund, dass die Pflanzen der Variante Kontrolle unter dem Foliendach einer bis zu 10 K höheren Lufttemperatur ausgesetzt waren, liegt die Vermutung nahe, dass die Wechselwirkung dieser Faktoren auch in der Thermographie den Effekt der hohen Einstrahlung auf die Stomata überlagerten und daher nicht zu erkennen waren.

Zusammenfassend lassen sich Trocken- und Strahlungstressreaktionen visuell gut differenzieren, was eine systematische Beschreibung der Stressreaktionen ermöglicht. Die Beschreibung der Stressreaktionen auf physiologischer Ebene mit Hilfe des Gaswechsels und der Thermographie ist durch die Wechselwirkung der Stressoren im Freiland und unter dem Foliendach erschwert worden. Nach sechs Tagen war jedoch ein deutlicher Effekt des Trockenstresses anhand der stomatären Leitfähigkeit bei der Variante Kombi-Stress im Vergleich zu der Variante Strahlungstress zu erkennen. Auch stieg die Pflanzentemperatur unter Trockenstress signifikant zur Variante Kontrolle an. Ein physiologischer Effekt des Strahlungstresses war unter diesen Bedingungen jedoch nicht zu erkennen. Ebenso kontrastierten die Sorten untereinander so gering, das sowohl in der Nekrosenintensität als auch in physiologischen Messungen keine sortenspezifischen Unterschiede zu erkennen waren. Daher können diese Methoden nicht zur Unterstützung der Hypothesen herangezogen werden.

7.4 Modifikation von Stressreaktionen verschiedener *Impatiens*-Genotypen durch Anzuchtbedingungen

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit bestand darin, zu prüfen, ob Stressreaktionen durch Anzuchtbedingungen modifiziert werden können. Hierzu fand eine Anzucht von *Impatiens*-Genotypen unter verschiedenem Strahlungsangebot statt. Für eine schattierte Anzucht wurde ein Schattiergewebe installiert, welches nur 30 % der ins Gewächshaus einfallenden Strahlung einließ. Daneben fand ohne Beeinflussung des Strahlungsangebotes eine unschattierte Anzucht statt. Zur Unterstützung der Arbeitshypothesen, ob Stresstoleranz durch Anzuchtbedingungen modifiziert werden kann, fanden während der Stressapplikation begleitende morphologische, anatomische und physiologische Untersuchungen statt.

Die tägliche Bewertung der Nekrosenintensität zeigte, dass in den fünf durchgeführten Vegetationsversuchen alle fünf Genotypen nach unschattierter Anzucht und anschließender Strahlungstressapplikation fast ausschließlich als symptomfrei bewertet werden konnten. Hingegen reagierten die stark schattiert angezogenen Pflanzen nach sieben Tagen mit einer ausgeprägten Intensität von oberseitigen Blattnekrosen (Abb. 43). Dadurch, dass die

Pflanzen nach unschattierter Anzucht weitgehend symptomfrei blieben, zeigt sich, dass die Anzuchtbedingungen einen weit größeren Einfluss auf die Strahlungsstresstoleranz ausüben können, als der Genotyp selber. Auch anatomisch zeigte sich, dass unschattiert angezogene Pflanzen nach einer 7-tägigen Strahlungsstressapplikation, im Gegensatz zu den schattiert angezogenen Pflanzen, intakte Zellen der Epidermis und des Palisadenparenchyms, sowie eine Vielzahl von Chloroplasten aufwiesen (Abb. 45).

Physiologische Untersuchungen aus den Versuchsjahren 2012 und 2013 zeigten zudem, dass die stomatäre Leitfähigkeit der unschattiert angezogenen Pflanzen unter Strahlungsstress auf einem weit höheren Niveau lag, als die der schattiert angezogenen Pflanzen (Abb. 46). Ähnliches haben FINI et al. (2010a), die *Camellia x williamsii* unter verschiedenem Strahlungsangebot kultiviert haben, beobachtet. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich zudem keine klare Differenzierung zwischen den Anzuchtbedingungen in der Variante Kombi-Stress. Die unschattiert angezogenen Pflanzen reagierten auf den zusätzlichen Trockenstress so stark, dass die stomatäre Leitfähigkeit auf das Niveau der schattiert angezogenen Pflanzen fiel (Abb. 46). Grund für dieses Verhalten könnte in der Wasserversorgung während der Anzucht liegen. Es wurde zwar belegt, dass es keinen signifikanten Einfluss der Schattierung auf die Lufttemperatur und auf die Luftfeuchte in Pflanzenhöhe gab (Tab. 3), dennoch zeigte sich, dass die unschattiert angezogenen Pflanzen einen weitaus höheren Wasserverbrauch aufwiesen und dadurch öfter bewässert wurden, als die schattiert angezogenen Pflanzen (Abb. 49). STREFELER und QUENÉ (1995) bestätigten, dass *Impatiens* Neuguinea unter hohen Strahlungsbedingungen einen hohen Wasserbedarf besitzen und damit eine regelmäßige Bewässerung benötigen. Untersuchungen von ERNST (2009) und KRATO (2012) zeigen zudem, dass diese unterschiedlichen Bewässerungsgaben die Physiologie und den Habitus der Pflanzen und damit auch das Welkeverhalten beeinflussen. In den dabei durchgeführten Dehydrierungsexperimenten reagierten *Impatiens* Neuguinea, die in der Anzucht wenig bewässert wurden, bei anschließenden Trockenstress bis zu einem Tag später mit Welkeerscheinungen, als *Impatiens* Neuguinea, die in der Anzucht häufig bewässert wurden. Dies könnte erklären, dass in der vorliegenden Arbeit die stomatäre Leitfähigkeit der unschattiert angezogenen Pflanzen auf den zusätzlichen Trockenstress ähnlich stark reagiert haben, als schattiert angezogene Pflanzen auf Trocken- und Strahlungsstress, so dass keine Differenzierung der Anzuchtbedingungen mit Hilfe der stomatären Leitfähigkeit in der Variante Kombi-Stress möglich war.

Begleitende Untersuchungen der Chlorophyll-Fluoreszenz zeigten, dass sich die Genotypen aus der unschattierten Anzucht nach 24 h Strahlungsstress signifikant im F_v/F_m -Index unterschieden (Abb. 48). Bei der Sorte ImP 'Logia' fiel nach 24 h Strahlungsstress der F_v/F_m -

Index auf ein weit niedrigeres Niveau ab, als bei der Sorte SunP 'Magenta'. Dieses Ergebnis korrespondiert jedoch nicht mit der Bonitur der Nekrosen, da beide Genotypen nach unschattierter Anzucht unter anschließendem Strahlungsstress symptomfrei blieben. Auffällig war jedoch, dass die Sorte SunP 'Magenta' nach unschattierter Anzucht ein signifikant höheres F_v/F_m -Verhältnis aufwies als nach schattierter Anzucht und sich dies ebenso in der Nekrosenintensität widerspiegelte. Auch in Untersuchungen von BURRITT und MACKENZIE (2003) wurden an *Begonia* zwischen Sonnenpflanzen und Schattenpflanzen, die in die Sonne ausgestellt wurden, signifikante Unterschiede in der Chlorophyll-Fluoreszenz beobachtet. Auf eine Beeinträchtigung des Zierwertes durch einen Abfall von F_v/F_m geht die Untersuchung jedoch nicht ein. In der vorliegenden Arbeit war dieser Effekt lediglich bei der Sorte SunP 'Magenta' zu beobachten. Die Sorte ImP 'Logia' reagierte nach unschattierter und schattierter Anzucht unter nachfolgendem Strahlungsstress ohne einen signifikanten Unterschied, reagierte aber nach schattierter Anzucht mit ausgeprägter Nekrosenbildung. Untersuchungen von SANUSI et al. (2011) zeigten, dass Geweihfarne unter hoher Einstrahlung mit einem signifikant geringerem F_v/F_m -Index reagieren. Ebenso wurde an Erdbeeren ein Einfluss von UV-B-Strahlung auf die Chlorophyll-Fluoreszenz festgestellt (HEIJARI et al. 2006). Die Chlorophyll-Fluoreszenz kann daher als eine spezifische Strahlungsstressreaktion eingeordnet werden, deren Messergebnisse in der vorliegenden Arbeit jedoch nur bedingt mit der Bonitur der Nekrosenintensität korrespondierten.

Das Zwischenfazit ist somit, dass die Identifizierung einer höheren stomatären Leitfähigkeit bei unschattiert angezogenen und somit toleranten Pflanzen unter Strahlungsstress nur mit einer ausreichenden Wasserversorgung möglich ist. Ein weiteres Fazit ist, dass der höhere Wasserbedarf in der Anzucht ein Grund dafür sein kann, warum sich unschattiert angezogene Pflanzen physiologisch nicht signifikant von den schattiert angezogenen Pflanzen unterscheiden, die vermutlich einem höheren oxidativen Stress ausgesetzt waren. Weiterhin kann die Chlorophyll-Fluoreszenz zur Identifizierung von stresstoleranten Pflanzen eingesetzt werden, da sich diese durch ein höheres F_v/F_m von sensiblen Pflanzen unterscheiden lassen. Da sich dies in der vorliegenden Arbeit jedoch nur bedingt zeigte, ist fraglich, ob Pflanzen, die in der Anzucht wenig bewässert wurden, unter Strahlungsstress physiologisch ähnlich reagieren wie Pflanzen, die in der Anzucht öfter bewässert wurden. Die Vielzahl der multiplen Stressreaktionen erschwert somit nicht nur die Gestaltung eines Prüfstandes, sondern auch die Interpretation der Daten und die Suche nach einem physiologischen Toleranzmarker für den Stressor Strahlungsstress.

7.5 Merkmale der Strahlungsstresstoleranz bei *Impatiens*-Genotypen

In der vorliegenden Arbeit wurde ausführlich dargestellt, dass eine ausgeprägte Modifikation der Stressreaktionen durch die Anzuchtbedingungen stattgefunden hat und dass dies auf dem Prüfstand nur schwer physiologisch, aber stark morphologisch zu erkennen war. Zunächst kann daher die Arbeitshypothese, dass die Strahlungsstresstoleranz durch die Anzuchtbedingungen modifiziert werden kann, zwar bestätigt werden. Aber es gilt zu klären, ob diese Strahlungsstresstoleranz schon vor der Stressapplikation identifiziert werden kann, wenn es während der Strahlungsstressapplikation nur bedingt möglich ist.

Bei morphologischen, anatomischen und physiologischen Untersuchungen zeigte sich, dass die Kompaktheit, die Blattdicke und die lichtabhängige Sättigungskurve der Photosynthese signifikant durch eine unschattierte Anzucht beeinflusst wurden (Abb. 53, Abb. 54 und Abb. 58). Den Einfluss des unterschiedlichen Strahlungsangebotes auf Pflanzen konnten auch Arbeiten von CHABOT und FINCHER CHABOT (1977), FINI et al. (2010a) HANBA et al. (2002) und WILSON und COOPER (1968) bestätigen. In der vorliegenden Arbeit war zu erkennen, dass sich *Impatiens* schon während der Anzuchtphase auf die herrschenden Bedingungen, die bei der unschattierten Anzucht dem Freiland sehr ähnelten, anpassen können. Ähnliches Verhalten wurden von HAQUE et al. (2014) für den Stressor Hitze beobachtet. In diesen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Weizen eine erhöhte Hitzestresstoleranz ausbildet, wenn die Anzucht bei 25 °C und nicht bei 15 °C stattgefunden hat. Ebenso wurde an Tomaten beobachtet, dass sich die Hitzestresstoleranz erhöht, wenn die Temperatur schrittweise erhöht wird und nicht abrupt verändert wird (BRUNOLD et al. 1996). In beiden Fällen wird dies mit einer einfacheren und besseren Synthese von Hitzeschockproteinen begründet, die sich langsam aufbauen und unter Stresssituationen eingreifen können. Bezogen auf das im Kapitel 2.5.1 beschriebene Anpassungsmodell von LARCHER (2001) wird dies mit einer modifikativen Anpassung erklärt, die auch FINI et al. (2010a) an Zierpflanzen beobachten konnten. Dabei reagierten unschattiert angezogene Pflanzen auf die höhere Strahlungsintensität mit dickeren Epidermiszellen, einem dickeren Palisaden- und Schwammparenchym und einer höheren Stomatadichte.

Es konnte somit bis dato dargestellt werden, dass *Impatiens*, die bei einem hohem Strahlungsangebot angezogen wurden, kompakter wachsen, kleinere und dickere Blätter, sowie ein besser differenziertes Blattgewebe aufweisen und auch nach einer extremen Strahlungsstressapplikation kaum Nekrosen ausbilden. Es lag daher nahe, zu prüfen, ob die als stresstolerant eingestuft Genotypen induzierte Toleranzeigenschaften ausbilden, die als mögliche Strahlungsstresstoleranzmarker abgeleitet werden können. Hierzu wurden die anzuchtbedingten morphologischen Merkmale mit Hilfe einer Rang-Korrelationsanalyse in Beziehung gesetzt.

Die nach der Anzuchtphase untersuchten morphologischen Merkmale der *Impatiens* zeigten einen ausgeprägten Einfluss der Anzuchtbedingungen. Rang-Korrelationsanalysen zur Berechnung eines Zusammenhanges zwischen diesen Merkmalen und der Intensität der Nekrosen machten sortenspezifische Unterschiede deutlich, die aber nicht artenspezifisch waren. Auffällig war dabei die Blattdicke. Innerhalb der Sorten verringerte sich die Blattdicke durch eine schattierte Anzucht signifikant. Die Nekrosenintensität erhöhte sich dafür auch signifikant (Abb. 62). Ein Zusammenhang ist damit sehr wahrscheinlich, jedoch nur mit Hilfe der schattierten Pflanzen sichtbar, da die unschattiert angezogenen Pflanzen unabhängig von der Blattdicke symptomfrei blieben. Deutlich wird dies bei Betrachtung der Daten über alle fünf Sorten und beider Anzuchtbedingungen. Auffällig ist, dass sich die Blattdicke zwischen der schattiert angezogenen Sorte ImP 'Moorea' und den unschattiert angezogenen Sorten ImP 'Timor' und SunP 'Orange' nicht signifikant unterscheiden, die schattiert angezogene Sorte ImP 'Moorea' im Gegensatz zu den beiden unschattiert angezogenen Sorten aber nicht symptomfrei blieb. Die Vermutung liegt daher nahe, dass sich die Blattdicke als Toleranzmarker für Strahlungsstress zwar eignet, dieses Merkmal aber sortenspezifisch ist. Ebenso wurde dies auch bei den morphologischen Merkmalen, wie Kompaktheit, spezifische Blattfläche und Pflanzengröße, beobachtet. Einen starken Zusammenhang beim Merkmal spezifische Blattfläche zeigte die Sorte ImP 'Logia', die Sorte SunP 'Orange' zeigte dieses nicht (Abb. 61). Hingegen zeigte die Sorte SunP 'Orange', im Gegensatz zur Sorte ImP 'Timor', einen signifikanten Zusammenhang zwischen Kompaktheit und Nekrosenintensität (Abb. 60).

Da *Impatiens* auf die Strahlungsstressbedingungen im Freiland ausgeprägt reagierten und deutliche Unterschiede zwischen unschattierter und schattierter Anzucht zu beobachten waren, jedoch unter den untersuchten morphologischen Merkmale kein klarer für alle Genotypen deutlicher Toleranzmarker gefunden werden konnte, liegt die Vermutung nahe, dass ein möglicher Toleranzmarker im Metabolismus der Pflanze zu finden sein könnte. In der vorliegenden Arbeit wurde die lichtabhängige Sättigungskurve der Photosynthese vor Applikation von Strahlungsstress der beiden Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' nach unschattierter und schattierter Anzucht untersucht. Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Anzuchtbedingungen durch eine signifikant höhere Leistung der unschattiert angezogenen Pflanzen (Abb. 58). Da sich dieser Verlauf jedoch statistisch nicht mit der Bonitur der Nekrosenintensität verrechnen lässt, ist eine Aussage zu einem Zusammenhang nicht möglich. Dennoch bestätigt es die Annahme, dass sich Pflanzen mit einer höheren PFD, die abrupt einer höheren Strahlungsintensität ausgesetzt werden, besser an diese Bedingungen anpassen können, als Pflanzen mit einer geringen PFD (BRUNOLD et al. 1996).

Merkmale, die jedoch nur quantitativ oder nicht erfasst wurden, sich aber nachfolgend als Toleranzmarker eignen könnten, sind Chlorophyllmenge und Aktivität von antioxydativen Enzymen. Die in der vorliegenden Arbeit erstellten Blattquerschnitte und auch die Photosyntheseaktivität geben zwar eine vage Auskunft über die Chlorophyllmenge, eine Quantifizierung ist jedoch damit nicht möglich. Allein aber die Tatsache, dass unschattiert angezogene *Impatiens*-Genotypen ein dickeres Palisadenparenchym aufwiesen (Abb. 57), kann darauf hindeuten, dass in diesen eine höhere Menge des Pigmentes vorhanden war und die Pflanzen damit in der Lage waren, die hohe Strahlungsenergie effektiver zu nutzen. Bestätigt wird diese These durch Untersuchungen von NYGREN und KELLOMAKI (1983), die an Birkensämlingen nach einer schattierten Anzucht eine Reduzierung des Mesophyllgewebes, sowie eine verringerte Photosyntheserate und eine verringerte Chlorophyllmenge pro Blattfläche feststellen konnten. Ebenso wurde in anderen Untersuchungen an Erdbeeren unter stark schattierten Bedingungen ein nicht vollständig entwickeltes Palisadenparenchym mit einer dementsprechend niedrigeren Photosyntheserate beobachtet (CHABOT & FINCHER CHABOT 1977). In beiden Untersuchungen wurde jedoch keine Toleranz auf Strahlungsstress getestet. Rückschlüsse auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind damit nicht möglich. Ob sich die Photosyntheserate und die Chlorophyllmenge als Toleranzmarker für Strahlungsstress eignen, ist aber nicht auszuschließen. Die Aktivität von antioxydativen Enzymen stellt ebenso ein sehr vielversprechendes Merkmal dar. GRIMME (2006) nutzte dieses Merkmal der Enzymaktivität zur Charakterisierung zweier Weizensorten bezüglich ihrer Sensitivität gegenüber oxidativem Stress. Dabei wies eine für physiologische Blattflecken anfällige Sorte eine höhere Aktivität des Enzyms SOD auf, als eine für physiologische Blattflecken weniger anfällige Sorte. Die Aktivität von Enzymen scheint daher ein sehr vielversprechender Toleranzmarker gegenüber Strahlungsstress zu sein. Dieses Messverfahren wurde jedoch aus Zeitgründen in der vorliegenden Arbeit nicht angewendet, könnte aber in eine weitere Untersuchung aufgenommen werden, um eine Übertragbarkeit auf *Impatiens* zu prüfen.

Die beiden Versuchsfragen, welche Merkmale strahlungsstresstolerante Pflanzen aufweisen und welche Merkmale der Strahlungsstresstoleranz durch die Anzuchtbedingungen modifiziert werden, können nicht eindeutig beantwortet werden. Dennoch zeigten die Merkmale Blattdicke und Anatomie des Blattes deutliches Potenzial als Toleranzmarker, die stark durch die Anzucht beeinflusst werden können und einen stärkeren Einfluss auf die Strahlungsstresstoleranz ausüben können, als der Genotyp selbst.

8. Abschließende Betrachtung

Die vorliegende Arbeit liefert Beiträge zur Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen. Es wurde anschaulich gezeigt, dass die Anzucht einen weit höheren Einfluss auf die Strahlungsstresstoleranz ausüben kann, als der Genotyp selbst. Dies ist Grund zur Diskussion mit welchen Möglichkeiten Produzent und Züchter die Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens* erhöhen können.

8.1 Möglichkeiten zur Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens* durch kulturtechnische Maßnahmen

Nach unschattierter Anzucht traten an keiner der fünf getesteten *Impatiens*-Sorten signifikante Schädigungen durch hohe Strahlungsenergie auf. Im Gegensatz dazu zeigten sich an allen Genotypen nach einer stark schattierten Anzucht blattoberseitige irreversible Aufhellungen. Dies spiegelt signifikant den Einfluss der Anzuchtbedingungen wider. Morphologische und anatomische Untersuchungen der Pflanzen nach der Anzucht zeigten deutlich, dass eine unschattierte Anzucht zu signifikant kompakteren Pflanzen mit dickeren Blättern führte. Laut LARCHER (2001) fand demnach eine modifikative Anpassung an die geltenden Strahlungsbedingungen statt. Eine natürliche Reaktion, die auch an Schatten- und Sonnenpflanzen zu beobachten ist oder an Bäumen, deren Blätter innerhalb der Krone größer sind als außerhalb. Die vorliegende Arbeit zeigte somit deutlich, dass die Strahlungsstresstoleranz stärker durch die Anzucht beeinflusst wird, als durch den Genotyp selbst. Ein Produzent kann folglich mit Hilfe von kulturtechnischen Maßnahmen aktiv in die Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens*-Genotypen eingreifen. Eine Kulturführung ohne Schattierung wurde in der vorliegenden Arbeit zwar erfolgreich angewendet, kann aber bei extremen Strahlungsbedingungen im Frühjahr zu Schädigungen führen. Als Abhilfe ist daher die Installation mehrerer Schattiergewebearten zu nennen. Dies kann dazu beitragen, individuell auf Strahlungsbedingungen zu reagieren. Oft werden Energieschirme für die Schattierung der Pflanzen zweckentfremdet. Energieschirme haben jedoch den Nachteil, dass den Pflanzen meist zu viel von der ins Gewächshaus einfallenden Strahlung entzogen wird. Dies zeigte auch die vorliegende Arbeit, in der Pflanzen verwendet wurden, die nur 30 % der ins Gewächshaus einfallenden Strahlung ausgesetzt waren, was zu schnell wachsenden und strahlungsstressempfindlicheren Pflanzen führte. Eine weitere Möglichkeit, um den Pflanzen mehr Strahlung in der Anzucht zur Verfügung zu stellen, ist die Produktion unter sauberen Gewächshausscheiben. Eine kostenintensive aber effektive Möglichkeit. Minimale Änderungen in der Kulturführung können demnach dafür sorgen, dass

qualitativ hochwertige strahlungsstresstolerante Pflanzen produziert werden können, die die bei Schwachlicht produzierten Pflanzen von Produzenten, die nur auf schnelles Wachstum aus sind, vom Markt verdrängen können. Wie die vorliegende Arbeit jedoch auch gezeigt hat, führt eine hellere Kulturführung dazu, dass *Impatiens*-Genotypen einen höheren Bewässerungsbedarf haben und unter Trockenstressbedingungen früher welken. Dies kann sich vor allem bei langen Vermarktungswegen und beim Kunden negativ äußern. Eine hellere Kulturführung zur Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz ist also nur eine kurzfristige Lösung.

8.2 Möglichkeiten zur Erhöhung der Strahlungsstresstoleranz von *Impatiens* durch züchterische Maßnahmen

Trotz des geringen Einflusses der Genotypen auf die Strahlungsstresstoleranz, zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit dennoch, dass sich züchterisch auf der Ebene der Stresstoleranz viel getan hat. Denn dass die fünf getesteten Genotypen nach einer unschattierten Anzucht keine differenzierten Reaktionen auf hohe Strahlungsenergie im Freiland gezeigt haben, verdeutlicht, wie weit die Züchtung der *Impatiens* vorangeschritten ist. Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch auch, wie sensitiv *Impatiens* morphologisch und physiologisch auf geminderte Strahlungsbedingungen in der Anzucht reagieren. Und damit wie heterogen das Pflanzenmaterial noch ist. Vorteilhaft wäre demnach eine Kreuzung und Selektion von Pflanzen, die unter geminderten Strahlungsbedingungen nur schwach reagieren und nicht weit von ihrem morphologischen und physiologischen Optimum abweichen. Dies hätte beim Produzenten den Vorteil, dass dieser eine leichte Schattierung einsetzen kann, die die Blattemperatur und damit auch die Bewässerungsvorgänge niedrig hält. Gleichzeitig würden sich die Morphologie und die Physiologie der Pflanze nicht ändern und eine nachfolgend hohe Strahlungsenergie würde keinen negativen Einfluss ausüben können. Würde zudem in der Züchtung eine Kreuzung und Selektion von Pflanzen stattfinden, die auch unter geminderten Strahlungsbedingungen mit einem dickeren Palisadenparenchyms und einer höheren Anzahl an Chloroplasten reagieren, könnte dies zu einer höheren Toleranz gegenüber Strahlungsstress führen. Ausgangspunkt ist, dass diese Pflanzen eine hohe photosynthetisch aktive Leistung bei niedrigerem und hohem Strahlungsangebot besitzen und erst spät in eine Sättigung der Lichtkurve gehen. Die in der vorliegenden Arbeit angewendeten Anzuchtbedingungen und Freilanduntersuchungen können mit leichtem technischem Aufwand in Züchtungsunternehmen umgesetzt werden, um dort als Screening-Programm für Trocken- und Strahlungsstresstoleranz zu fungieren.

8.3 Schlussfolgerungen für den wissenschaftlichen Neuwert und für weiterführende Arbeiten

Als wissenschaftlicher Neuwert der vorliegenden Arbeit ist die detaillierte Beschreibung und bildliche Dokumentation von Strahlungstressreaktionen an *Impatiens*-Genotypen zu nennen. Durch diese Arbeit ist es nun möglich, Trockenstressreaktionen von Strahlungstressreaktionen noch genauer zu differenzieren.

Auf der physiologischen Ebene wurde jedoch deutlich, dass eine Differenzierung der Reaktionen schwierig ist. Auch auf Grund von weiteren im Freiland befindlichen Stressoren, die zusammen einen multiplen Stress bei *Impatiens* ausgelöst haben. Dazu trug bei, dass die stomatäre Leitfähigkeit und die Thermographie zu stark vom Wasserhaushalt und von den Anzuchtbedingungen der Pflanzen beeinflusst werden, als dass mit diesen Methoden eine Selektion der getesteten Sorten auf Strahlungstress möglich wäre. Lediglich die Chlorophyll-Fluoreszenz, die direkt die maximale Quantenausbeute des PSII (F_v/F_m) erfasst, konnte zur Identifizierung der Stressvarianten beitragen. All diese Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit tragen dazu bei, Strahlungstress am Beispiel der *Impatiens* besser zu verstehen. Es konnte daher eine solide Grundlage geschaffen werden, auf die weiterführende Arbeiten aufbauen können. Dazu zählt unter anderen die inhaltstoffliche Veränderung von Pflanzenblättern unter Strahlungstress, wie der Gehalt an antioxidativen Enzymen oder Anthocyanen.

Auch eröffnet diese Arbeit die Möglichkeit, fernerkundlich zu arbeiten. Die spektrale Fernerkundung basiert auf der Tatsache, dass jeder Körper Strahlung in gewissen Spektralbereichen mal mehr und mal weniger reflektiert. So reflektieren gesunde Pflanzen im sichtbaren Spektralbereich relativ wenig und im Infrarot-Bereich hingegen viel. Mit Hilfe des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) lassen sich Rückschlüsse auf die photosynthetische Aktivität und die Dichte eines Bestandes ziehen (GAMON et al. 1995). Für die Erfassung dieser Reflexion werden Satelliten gestützte Aufnahmen verwendet. Es wäre aber auch möglich, mit Spezialkameras und einem Kopter zu arbeiten (BERNI et al. 2009). In Verbindung mit einem Hochdurchsatzverfahren wäre eine Anwendung bei Züchtern zur Selektion von stresstoleranten Genotypen vorstellbar und auch teilflächenspezifisch anwendbar.

9. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet Beiträge zur Charakterisierung der Strahlungsstresstoleranz am Beispiel von *Impatiens*-Genotypen unter der Berücksichtigung morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale. Aufbauend auf Literaturstudien und Vegetationsversuchen wurden die Fragestellungen, was typische Strahlungsstressschäden an *Impatiens* sind, ob es im Sortiment der *Impatiens* strahlungsstresstolerante Genotypen gibt, welche Merkmale auf Strahlungsstress hinweisen und welche Merkmale der Strahlungsstresstoleranz durch die Anzuchtbedingung modifiziert werden, bearbeitet.

Für diese Bearbeitung fiel die Wahl auf fünf marktbedeutende *Impatiens*-Sorten. Aus der Serie Paradise die drei Sorten ImP 'Logia', ImP 'Moorea' und ImP 'Timor' und aus der Serie SunPatiens die zwei Sorten SunP 'Magenta' und SunP 'Orange'. Um der Versuchsfrage nach Strahlungsstressschäden und -reaktionen nachzugehen, wurde das Pflanzenmaterial in der Anzucht sensibilisiert. Dies erfolgte mit einer Anzucht unter einer Schattierung, die nur noch 30 % der ins Gewächshaus einfallenden Strahlung, gemessen auf Bestandshöhe, durchließ. Parallel dazu fand eine unschattierte Anzucht statt, um den Einfluss der Anzuchtbedingung auf eine spätere Strahlungsstresstoleranz zu prüfen. Nach einer 10-wöchigen Anzucht fand eine Phänotypisierung auf Basis von morphologischen, anatomischen und physiologischen Untersuchungen statt. Berücksichtigt wurden dabei die Schattenbildfläche, Kompaktheit, spezifische Blattfläche, Dicke der einzelnen Gewebeschichten im Blatt und die lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate.

Die Applikation von Strahlungsstress erfolgte im Freiland unter natürlicher Globalstrahlung. Dafür wurden die Pflanzen in regensichere Pflanzgefäße überführt und in die Varianten Kontrolle, UV-Stress, Strahlungsstress und Kombi-Stress eingeteilt. Die Pflanzen der Variante Kontrolle standen unter einem UV-undurchlässigen Foliendach, die der Variante UV-Stress unter einem UV-durchlässigen Foliendach und die der Variante Strahlungsstress im Freiland. Alle Pflanzen dieser drei Varianten wurden täglich gewogen und nach Unterschreitung eines kritischen Schwellenwertes bewässert. Die Pflanzen der Variante Kombi-Stress standen ebenfalls im Freiland, wurden zwar täglich gewogen aber es fand keine Ausgleichbewässerung statt, um den Effekt von zusätzlichem Trockenstress zum Strahlungsstress zu studieren.

Parallel dazu fand in einem Kunstlichtprüfstand eine Strahlungsstressapplikation mit einem Halogenstrahler statt. Da die beobachteten Reaktionen jedoch nicht mit denen aus dem Freiland übereinstimmten, wurde dieser Prüfstand nicht weiter verfolgt.

Während der Freilandexperimente wurden die Pflanzen täglich beobachtet und Welke und Nekrosen mit einem 5-stufigen Boniturschema bewertet. Daneben fanden Messungen der stomatären Leitfähigkeit, des Wärme- und Wasserhaushaltes und der Chlorophyll-Fluoreszenz statt. Ebenso wurden gesunde und geschädigte Blätter entnommen und histologisch untersucht, um der Entstehung von Nekrosen nach zu gehen.

Die Anzucht der Pflanzen sowie die darauffolgende Strahlungsstressapplikation im Freiland wurden in fünf Sätzen in den Jahren 2012, 2013 und 2014 wiederholt. Dabei wurde deutlich, dass die schattiert angezogenen Pflanzen sehr stark mit weißlich-braunen irreversiblen Aufhellungen (Nekrosen) an der zur Sonne gerichteten Blattoberseite reagierten. Sortenunterschiede in der Nekrosenintensität waren nicht festzustellen, jedoch konnte statistisch bewiesen werden, dass in den ersten sieben Tagen der Überführung von einem geschützten Gewächshaus ins Freiland, die *SunPatiens* signifikant stärker geschädigt wurden, als die klassischen *Impatiens*. Außerdem konnte beobachtet werden, dass ein zusätzlicher Trockenstress der Variante Kombi-Stress die Nekrosenintensität nicht zusätzlich beeinflusste. Reaktionen auf eine höhere UV-Strahlung äußerten sich ebenfalls in weißlich-braunen Nekrosen, jedoch war die Intensität geringer als unter hoher Globalstrahlung. Die Pflanzen der unschattierten Anzucht zeigten im Freiland keine Reaktionen auf die höhere Globalstrahlung. Demzufolge hat die Anzuchtbedingung die Strahlungsstresstoleranz modifiziert und es wurde deutlich, dass der Effekt der Anzucht größer war, als der Effekt des Genotyps.

Messungen der stomatären Leitfähigkeit verdeutlichen den geringen genotypischen Effekt. Sortenunterschiede waren weder bei unschattierten noch bei schattierten Pflanzen zu erkennen. Es konnte jedoch deutlich gezeigt werden, dass unter Strahlungsstress die schattiert angezogenen Pflanzen eine signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit aufwiesen, als die unschattiert angezogenen Pflanzen, was auch mit der Nekrosenintensität korrelierte. Es könnte sich dabei jedoch um eine Schein-Korrelation handeln, da die stomatäre Leitfähigkeit auch von der Anzahl der Stomata beeinflusst wird und diese wiederum durch das Strahlungsangebot bei der Entwicklung des Blattes beeinflusst wird. Eine Differenzierung der Anzuchtbedingungen mit der stomatären Leitfähigkeit war in der Variante Kombi-Stress nicht möglich, was deutlich auf einen Einfluss des Trockenstresses auf die Messergebnisse hinwies. Auch der Wärme- und Wasserhaushalt der Pflanzen, der mittels Thermographie und des Crop Water Stress Index erfasst wurde, gab keinen Hinweis auf eine Strahlungsstresstoleranz, weder bei den unschattiert angezogenen *Impatiens*, noch bei den symptomfreien Pflanzen der Variante Kontrolle oder den stark reagierenden Pflanzen der Variante Strahlungsstress der schattiert angezogenen Pflanzen. Wie sich herausstellte, standen die Pflanzen der Variante Kontrolle unter dem Foliendach bei einer

Lufttemperatur, die bis zu 10 K über den Freilandbedingungen lag, was bedeutet, dass diese Bedingungen den Wasser- und Wärmehaushalt ebenso stark wie das höhere Strahlungsangebot im Freiland beeinflussten. Die maximale Quantenausbeute des PSII (F_v/F_m) blieb von den unterschiedlichen Lufttemperaturen unbeeinflusst. Nach 24 h Strahlungsstress zeigten die Pflanzen der schattierten Anzucht in der Variante Strahlungsstress ein signifikant geringeres F_v/F_m -Niveau als die Pflanzen in der Variante Kontrolle. Nach unschattierter Anzucht war zwar ein signifikanter Unterschied zwischen den Sorten ImP 'Logia' und SunP 'Magenta' zu erkennen, dieser Unterschied zeigte sich aber nicht bei der Nekrosenintensität. Ein signifikanter Unterschied war nach unschattierter Anzucht nur bei der Sorte SunP 'Magenta' zu erkennen. Fazit ist, dass die Thermographie zur Identifizierung von Strahlungsstress nicht in Frage kommt und die stomatäre Leitfähigkeit nur, wenn kein zusätzlicher Einfluss von Trockenstress auftritt. Die Messung der Chlorophyll-Fluoreszenz kann zudem auch nur bedingt eingesetzt werden. Somit wurden während der Strahlungsstressapplikation keine Methode und auch kein Merkmal identifiziert, das auf eine Strahlungsstresstoleranz hindeutet.

Die Bewertung der Nekrosenintensität zeigte jedoch einen deutlichen Einfluss des Strahlungsangebotes während der Anzucht auf die Strahlungsstresstoleranz der *Impatiens*. Es wurde daher geprüft, ob anzuchtbedingte Merkmale der Pflanzen nach der Anzucht zur Identifizierung der Strahlungsstresstoleranz beitragen können. Wie sich zeigt, lag ein stark sortenspezifischer Zusammenhang zwischen anzuchtbedingten Merkmalen und der Nekrosenintensität vor. So wiesen im Mittel der fünf Versuchssätze einige unschattiert angezogene Pflanzen dieselbe Schattenbildfläche, Kompaktheit, spezifische Blattfläche und Blattdicke auf wie schattiert angezogene Pflanzen, blieben aber gegenüber den schattiert angezogenen Pflanzen unter Strahlungsstressbedingungen im Freiland symptomfrei. Daraus wird deutlich, dass keines der erfassten anzuchtbedingten Merkmale für eine Früherkennung der Strahlungsstresstoleranz in Frage kommen kann. Lediglich die lichtabhängige Sättigungskurve der Photosyntheserate sowie die histologischen Untersuchungen der Blätter zeigten bei allen Sorten die Entwicklung von physiologischen und anatomischen Schattenblättern nach unschattierter Anzucht. Dies verdeutlicht, dass die Möglichkeit, die hohe Strahlungsenergie während der Strahlungsstressapplikation aufnehmen und umwandeln zu können, erheblich eingeschränkt war und dass dies zu einer erhöhten Bildung der reaktiven Sauerstoffradikale geführt haben könnte.

Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen zielen darauf hin, inhaltsstoffliche Analysen der *Impatiens* vor und während der Strahlungsstressapplikation durchzuführen, um unter anderem mit dem Enzym Superoxiddismutase ein Abwehrverhalten und damit auch eine Stresssituation nachzuweisen.

10. Literaturverzeichnis

- ALBERT, R. (2008): Anpassung von Pflanzen an trockene Standorte. in: H. WIESBAUER. Die Steppe lebt: Felssteppen und Trockenrasen in Niederösterreich. 87-100. Amt der NÖ Landesregierung.
- AMBERGER-OCHSENBAUER, S. (2014): Untersuchungen zur Kühletoleranz von *Impatiens*. in: BHGL-Tagungsband 30.
- AMI (2012): Top 10 2011 – In allen Segmenten Bewegung. <<http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/Hortigate.woa/vb/bericht?nr=53168>>, 30.04.2013.
- ANYIA, A. O. & HERZOG, H. (2004): Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. European Journal of Agronomy, 20, (4), 327-339.
- ARORA, A., SAIRAM, R. K. & SRIVASTAVA, G. C. (2002): Oxidative stress and antioxidative system in plants. Current Science, 82, (10), 1227–1236.
- ATANASOVA, L., STEFANOV, D., YORDANOV, I., KORNOVA, K. & KAVARDZIKOV, L. (2003): Comparative Characteristics of Growth and Photosynthesis of Sun and Shade Leaves from Normal and Pendulum Walnut (*Juglans regia* L.) Trees. Photosynthetica, 41, (2), 289-292.
- ATKINSON, N. J. & URWIN, P. E. (2012): The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. Journal of Experimental Botany, 63, (10), 3523-3543.
- AYENEH, A., VAN GINKEL, M., REYNOLDS, M. P. & AMMAR, K. (2002): Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. Field Crops Research, 79, (2–3), 173-184.
- BAILEY, D. A. (1999): Commercial Produktion of New Guinea *Impatiens*. Horticulture Information Leaflet, 526, (8), 1-10.
- BALLARE, C. L. (2003): Stress Under the Sun: Spotlight on Ultraviolet-B Responses. Plant Physiology, 132, (4), 1725–1727.
- BASIOUNY, F. M., VAN, T. K. & BIGGS, R. H. (1978): Some Morphological and Biochemical Characteristics of C3 and C4 Plants Irradiated with UVB. Physiologia Plantarum, 42, 29–32.

- BATSCHAUER, A. (1993): A plant gene for photolyase: an enzyme catalyzing the repair of UV-light-induced DNA damage. *The Plant Journal*, 4, (4), 705-709.
- BECK, E. G. (2005): Mutagene, DNA-Reparatur. <<http://www.ernst-beck.de/skripten/13/bs13-5c.htm>>, 20.01.2011.
- BENJAMIN, J. M. (1990): The History and Development of New Guinea *Impatiens*. Master, University of Delaware.
- BERNI, J., ZARCO-TEJADA, P. J., SUAREZ, L. & FERERES, E. (2009): Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47, (3), 722-738.
- BETTIN, A. (2011): Kulturtechniken im Zierpflanzenbau. Ulmer, Stuttgart.
- BEYEL, V. (2003): Wirkung von Trockenstreß auf unterschiedliche Kultivare von *Sorghum bicolor*. Dissertation, Fachbereich Biologie und Informatik, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main.
- BLANCHARD, M. G., RUNKLE, E. S., BOTH, A.-J. & SHIMIZU, H. (2012): Greenhouse Energy Curtains Influence Shoot-tip Temperature of New Guinea *Impatiens*. *Horticultural Science*, 47, (4), 483-488.
- BLANUSA, T., VYSINI, E. & CAMERON, W. F. (2009): Growth and Flowering of *Petunia* and *Impatiens*: Effects of Competition and Reduced Water Content Within a Container. *Horticultural Science*, 44, (5), 1302-1307.
- BMBF (2014): Deutsches Pflanzen Phänotypisierungs Netzwerk (DPPN). <www.bmbf.de/de/21116.php>, 06.07.2015.
- BORKOWSKA, B. (2006): Chlorophyll a Fluorescence Method as a Physiological Marker of Plant Response to Light Stress and Endo-mycorrhiza (AMF). *Acta Hort. (ISHS)*, 711, 177-182.
- BOYER, J. S. (1971): Nonstomatal Inhibition of Photosynthesis in Sunflower at Low Leaf Water Potentials and High Light Intensities. *Plant Physiology*, 48, 532-536.
- BRITT, A. B. (1996): DNA Damage and Repair in Plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 47, 75-100.
- BRUNOLD, C., RÜEGSEGG, A. & BRÄNDLE, R. (1996): Stress bei Pflanzen. UTB GmbH, Bern.
- BUNDESSORTENAMT (2000): Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen. Landbuch Verlag, Hannover.

- BURRITT, D. J. & MACKENZIE, S. (2003): Antioxidant Metabolism during Acclimation of *Begonia x erythrophylla* to High Light Levels. *Annals of Botany*, 91, (7), 783–794.
- CEN, Y.-P. & BORNMAN, J. F. (1990): The Response of Bean Plants to UV-B Radiation Under Different Irradiances of Background Visible Light. *Journal of Experimental Botany*, 41, (11), 1489-1495.
- CHABOT, B. F. & FINCHER CHABOT, J. (1977): Effects of Light and Temperature on Leaf Anatomy and Photosynthesis in *Fragaria vesca*. *Oecologia*, 26, 363–377.
- CHAVES, M. M., MAROCO, J. P. & PEREIRA, J. S. (2003): Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30, (3), 239–264.
- CHOI, A. O., CHO, S. J., DESBARATS, J., LOVRIC, J. & MAYSINGER, D. (2007): Quantum dot-induced cell death involves Fas upregulation and lipid peroxidation in human neuroblastoma cells. *Journal of nanobiotechnology*, 5, 1-13.
- CHOINSKI, J. S. & JOHNSON, J. M. (1992): Changes in photosynthesis and water status of developing leaves of *Brachystegia spiciformis* Benth. *Tree Physiology*, 13, 17–27.
- CLASSEN-BOCKHOFF, R. (2001): Vom Umgang mit der Vielfalt - eine kurze Geschichte der Pflanzenmorphologie. *Wulfenia*, 8, 125-144.
- DAY, T. A. & VOGELMANN, T. C. (1995): Alterations in photosynthesis and pigment distributions in pea leaves following UV-B exposure. *Physiologia Plantarum*, 94, 433-440.
- DLR (2014): Das Ozonloch wird sich schließen: DLR-Wissenschaftler tragen zu neuen Erkenntnissen bei. <www.dlr.de/dlr/presse/desktopdefault.aspx/tabid-10172/213_read-11728/#/gallery/16651>, 08.07.2015.
- ERNST, M. (2009): *Impatiens* Neu-Guinea: Sortiment und Trockenstress. *Gärtnerbörse*, 32–33.
- EVERT, R. F., LANGENFELD-HEYSER, R., BLECHSCHMIDT-SCHNEIDER, S., FISCHER, U., OLBRICH, A., SCHMITT, U. & EICHHORN, S. E. (2009): *Esaus Pflanzenanatomie: Meristeme, Zellen und Gewebe der Pflanzen - ihre Struktur, Funktion und Entwicklung*. De Gruyter.
- FINI, A., FERRINI, F., FRANGI, G., AMAROSO, G. & GIORDANO, C. (2010a): Growth, Leaf Gas Exchange and Leaf Anatomy of three Ornamental Shrubs Grown under different Light Intensities. *European Journal of Horticultural Science*, 73, (3), 111–117.

- FINI, A., FERRINI, F., FRANGI, G., AMAROSO, G. & PIATTI, R. (2010b): Effects of Shading on Growth, Leaf Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence of Three Container-Grown Shrubs. *Acta Hort. (ISHS)*, 885, 109–117.
- FISCHER-KLÜVER, G. (2011): Visionen und Innovationen. *DEGA*, 3, 6-7.
- GAMON, J. A., FIELD, C. B., GOULDEN, M. L., GRIFFIN, K. L., HARTLEY, A. E., JOEL, G., PENUELAS, J. & VALENTINI, R. (1995): Relationships Between NDVI, Conopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecological Applications*, 5, (1), 28-41.
- GATES, D. M. (1980): *Biophysical ecology*. Springer-Verlag.
- GEBAUER, J. (2003): *Ökophysiologie und Verwendungsmöglichkeiten der Wildobstarten Adansonia digitata und Tamarindus indica im Sudan*. Dissertation, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin.
- GEBHARDT, A. (1984): Möglichkeiten zur Früherkennung phytopathologischer Erscheinungen mit Hilfe der Thermografie — Übersicht und erste Ergebnisse. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, 20, (5), 437-445.
- GERLACH, D. (1984): *Botanische Mikrotechnik - Eine Einführung*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- GIVNISH, T. J. (1988): Adaptation to Sun and Shade: A Whole-plant Perspective. *Australian Journal of Plant Physiology*, 15, 63-92.
- GRIMME, E. (2006): *Abiotischer Stress in Weizenblättern: Reaktionen im Photosynthese-Apparat in Relation zum Stressmetabolismus*. Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen.
- HALLMANN, J., QUADT-HALLMANN, A. & TIEDEMANN VON, A. (2007): *Phytomedizin - Grundwissen Bachelor*. Ulmer, Stuttgart.
- HANBA, Y. T., KOGAMI, H. & TERASHIMA, I. (2002): The effect of growth irradiance on leaf anatomy and photosynthesis in *Acer species* differing in light demand. *Plant, Cell and Environment*, 25, 1021–1030.
- HANSEN, C. W., K., P. K. & LARSEN, A. K. (2005): Effects of Reduced Nutrient and Water Availability on Plant Growth and Post-Production Quality of *Hibiscus rosa-sinensis*. *Acta Hort. (ISHS)*, 669, 269-274.
- HAQUE, M. S., KJAER, K. H., ROSENQVIST, E., SHARMA, D. K. & OTTOSEN, C.-O. (2014): Heat stress and recovery of photosystem II efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.)

- cultivars acclimated to different growth temperatures. *Environmental and Experimental Botany*, 99, (0), 1-8.
- HASSANEIN, A. & DORIOIN, N. (2006): Determining morphological and physiological parameters for the selection of drought-tolerant geraniums (*Pelargonium x hortorum* L. H. Bailey). *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81, (4), 707-713.
- HAYER, D. L. & SCHUCH, U. K. (1996): Production and Postproduction Performance of Two Neu Guinea *Impatiens* Cultivars Grown with Controlled-release Fertilizer and No Leaching. *American Society for Horticultural Science*, 121, 820-825.
- HEARST, J. E. (1995): The Structure of Photolyase: Using Photon Energy for DNA Repair. *Science*, 268, (5219), 1858-1859.
- HEIJARI, J., KIVIMÄENPÄÄ, M., HARTIKAINEN, H., JULKUNEN-TIITTO, R. & WULFF, A. (2006): Responses of Strawberry (*Fragaria x ananassa*) to Supplemental UV-B Radiation and Selenium Under Field Conditions. *Plant and Soil*, 282, (1-2), 27-39.
- HEINRICH, I. (2009): Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotthermographie zur Detektion von Cero-spore-Blattflecken, echter Mehltau und Rüberrrost an Zuckerrüben. Dissertation, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- HEß, D. (2008): Pflanzenphysiologie. UTB GmbH, Stuttgart.
- HOFFMANN, S. (1999a): Die Wirkung von UV-Strahlung auf Blatt- und Blütenfarbe von Zierpflanzen. *Gartenbauwissenschaft*, 64, (2), 88–93.
- HOFFMANN, S. (1999b): Zur Wirkung von photoselektiven Bedachungsmaterialien auf Zierpflanzen. Inst. für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft Univ. Hannover.
- HOLMES, M. G. & KEILLER, D. R. (2002): Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species. *Plant, Cell & Environment*, 25, (1), 85-93.
- HORN, W. (1996): Zierpflanzenbau. Blackwell Verlag GmbH, Berlin.
- HORST, W. J. & MARSCHNER, H. (1978): Symptome von Mangan-Überschuß bei Bohnen (*Phaseolus vulgaris*). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 141, (2), 129-142.
- HSIAO, T. C. (1973): Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24, 519-570.

- IDSO, S. B., JACKSON, R. D., PINTER JR, P. J., REGINATO, R. J. & HATFIELD, J. L. (1981): Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, (0), 45-55.
- INDORF, A. (2001): Licht- und UV-B-Wirkung auf die Bildung von Lignin, Flavonoiden und Tanninen in Keimlingen der Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.). Dissertation, Fakultät für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. & PINTER, P. J. (1981): Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, (4), 1133-1138.
- JACKSON, R. D., KUSTAS, W. P. & CHOUDHURY, B. J. (1988): A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 9, (4), 309–317.
- JANKA, E., KÖRNER, O., ROSENQVIST, E. & OTTOSEN, C.-O. (2013): High temperature stress monitoring and detection using chlorophyll a fluorescence and infrared thermography in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 67, (0), 87-94.
- JANSEN, M. A. K., GABA, V. & GREENBERG, B. M. (1998): Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends in Plant Science*, 3, (4), 131–135.
- JIFON, J. L. & SYVERTSEN, J. P. (2003): Moderate shade can increase net gas exchange and reduce photoinhibition in citrus leaves. *Tree Physiology*, 23, 119-127.
- JONES, H. G. (1999a): Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, (3), 139-149.
- JONES, H. G. (1999b): Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell & Environment*, 22, (9), 1043-1055.
- JONES, H. G., AIKMAN, D. A. & MCBURNEY, T. (1997): Improvements to infrared thermometry for irrigation scheduling. *Acta Hort. (ISHS)*, 449, 259-266.
- JONES, H. G., SERRAJ, R., LOVEYS, B. R., XIONG, L., WHEATON, A. & PRICE, A. H. (2009): Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36, 978-989.
- JONES, H. G., STOLL, M., SANTOS, T., SOUSA, C. D., CHAVES, M. M. & GRANT, O. M. (2002): Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53, (378), 2249-2260.

- KAKANI, V. G., REDDY, K. R., ZHAO, D. & MOHAMMED, A. R. (2003): Effects of Ultraviolet-B Radiation on Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Morphology and Anatomy. *Annals of Botany*, 91, (7), 817-826.
- KARABOURNIOTIS, G., KYPARISSIS, A. & MANETAS, Y. (1993): Leaf hairs of *Olea europaea* protect underlying tissues against ultraviolet-B radiation damage. *Environmental and Experimental Botany*, 33, (3), 341-345.
- KAUFMANN, P. (2006): F-CLEAN - eine gute Alternative zu herkömmlichen Gewächshauseindeckungen. *Gartenbau Report*, 9, 32-33.
- KILLGUS, C. (2006): Es gibt so viele Anregungen. *DEGA*, 30, 29-36.
- KIMURA, S. & SAKAGUCHI, K. (2006): DNA Repair in Plants. *American Chemical Society*, 106, (2), 753-766.
- KRATO, T. (2012): Identifizierung und Quantifizierung von Trockenstressreaktionen an ausgewählten Zierpflanzenkulturen. Dissertation, Fachgebiet Ertragsphysiologie der Sonderkulturen, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften Universität Hohenheim.
- LANGKAMP, T. & SPINAROVA, S. (2014): Das Anpassungspotential von *Impatiens* an Strahlungsstress. *Gärtnerbörse*, 1, 57-59.
- LARCHER, W. (1987): Streß bei Pflanzen. *Naturwissenschaften*, 74, (4), 158-167.
- LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. UTB GmbH, Stuttgart.
- LARCHER, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. Ulmer.
- LEINONEN, I. & JONES, H. G. (2004): Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55, (401), 1423–1431.
- LENTHE, J.-H. (2005): Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermografie. Dissertation, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- LFU (2009): Ozonschicht und Ozonloch.
<http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_48_ozonschicht_ozonloch.pdf>,
27.04.2011.
- LÖSCH, R. (2001): Wasserhaushalt der Pflanzen. Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

- LUDOLPH, D. (1995): Wirkung der Lichtmenge auf Wachstum und Blühen von Zierpflanzen und ihre Anwendung zur Kultursteuern. Dissertation, Fachbereich Gartenbau, Universität Hannover.
- MCKERSIE, B. D. (1996): Oxidative Stress. <http://www.plantstress.com/Articles/Oxidative%20Stress.htm>, 14.12.2011.
- MERLOT, S., MUSTILLI, A.-C., GENTY, B., NORTH, H., LEFEBVRE, V., SOTTA, B., VAVASSEUR, A. & GIRAUDAT, J. (2002): Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation. *The Plant Journal*, 30, (5), 601-609.
- MEYER, J., PIETZSCH, M., SCHMIDT, U. & GRUDA, N. (2011): Nutzung der Restwärme einer Geothermie-Anlage zur CO₂-neutralen Beheizung eines Gewächshauskomplexes. Abschlussbericht Technische Universität München, Humboldt-Universität zu Berlin.
- MITTLER, R. (2002): Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7, (9), 405–410.
- MORGAN, D. C., O'BRIEN, T. & SMITH, H. (1980): Rapid Photomodulation of Stem Extension in Light-grown *Sinapis alba* L. *Planta*, 150, 95-101.
- NEILL, S. O. (2002): The functional role of anthocyanins in leaves. Dissertation, Biological Sciences, University of Auckland.
- NILSSON, H.-E. & LINNÉR, H. (1987): IR-thermography of Canopy Temperatures of Wheat and Barley at Different Nitrogen Fertilization and Irrigation. Swedish University of Agricultural Sciences, Research Information Centre.
- NOGUÉS, S., ALLEN, D. J., MORISON, J. I. L. & BAKER, N. R. (1998): Ultraviolet-B Radiation Effects on Water Relations, Leaf Development, and Photosynthesis in Droughted Pea Plants. *Plant Physiology*, 117, (1), 173-181.
- NYGREN, M. & KELLOMAKI, S. (1983): Effect of shading on leaf structure and photosynthesis in young birches, *Betula pendula* Roth. and *B. pubescens* Ehrh. *Forest Ecology and Management*, 7, 119–132.
- OBERHUBER, W. & BAUER, H. (1991): Photoinhibition of photosynthesis under natural conditions in ivy (*Hedera helix* L.) growing in an understory of deciduous trees. *Planta*, 185, (4), 545-553.
- PERCIVAL, G. C. (2005): The use of chlorophyll fluorescence to identify chemical and environmental stress in leaf tissue of three oak (*Quercus*) species. *Journal of Arboriculture*, 31, (5), 215-227.

- PIGLIUCCI, M., CAMMELL, K. & SCHMITT, J. (1999): Evolution of phenotypic plasticity a comparative approach in the phylogenetic neighbourhood of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Evolutionary Biology*, 12, (4), 779-791.
- POWLES, S. B. (1984): Photoinhibition of Photosynthesis Induced by Visible Light. *Annual Review of Plant Physiology*, 35, 15-44.
- RAHIM, M. A. & FORDHAM, R. (1991): Effect of Shade on Leaf and Cell Size and Number of Epidermal Cells in Garlic. *Annals of Botany*, 67, 167-171.
- RÖBER, R. & WOHANKA, W. (2014): 90 Kulturen im Zierpflanzenbau. Ulmer, Stuttgart.
- ROSS, J. (1981): The radiation regime and architecture of plant stands. Kulwer Academic Publishers Group, Niederlande.
- ROZEMA, J., VAN DE STAAL, J., BJÖRN, L. O. & CALDWELL, M. (1997): UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *Trends in Ecology & Evolution*, 12, (1), 22-28.
- SAKATA (2011): Was Sie über SunPatiens® wissen sollten. www.sunpatiens.de/ccLib/attachments/pages/SunPatiens+Culture+Guide+D+print+version+2012_2.pdf, 19.07.2015.
- SANUSI, R.-A. M., NURUDDIN, A. A. & HAMID, H. A. (2011): Leaf Chlorophyll Fluorescence and Gas Exchange Response to Different Light Levels in *Platyserium bifurcatum*. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6, (2), 214-220.
- SCHÄFER, C. & SCHMID, V. (1993): Pflanzen im Lichtstreß. Überleben durch biochemische Schutz- und Reparaturmechanismen. *Biologie in unserer Zeit*, 23, (1), 55–62.
- SCHMUTHS, H. (2004): Genetische Variabilität und phänotypische Plastizität der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (Brassicaceae). Dissertation, Institut für Pflanzenzüchtung und Pflanzenschutz der Landwirtschaftlichen Fakultät, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg.
- SCHÖPKE, T. (2012): Skript Morphologie, Histologie und Anatomie der Pflanzen. <http://pharm1.pharmazie.uni-greifswald.de/allgemei/morph-v/mor-regi.htm>, 07.03.2012.
- SCHUBERT, S. (2006): Pflanzenernährung: Grundwissen Bachelor : 55 Tabellen. Ulmer.
- SCHULZE, E. D., BECK, E. & MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2005): Environment as Stress Factor: Stress Physiology of Plants. in: *Plant Ecology*. Springer.
- SELYE, H. (1936): A Syndrome Produced by Diverse Nocuous Agents. *Nature*, 138, 32.

- SELYE, H. (1973): The Evolution of the Stress Concept. *American Scientist*, 61, 693-699.
- SINHA, R. P. & HÄDER, D.-P. (2002): UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 1, (4), 225-236.
- STAPLETON, A. E. (1992): Ultraviolet Radiation and Plants: Burning Questions. *The Plant Cell*, (4), 1353–1358.
- STARMAN, T. & LOMBARDINI, L. (2006): Growth, Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence of Four Ornamental Herbaceous Perennials during Water Deficit Conditions. *American Society for Horticultural Science*, 131, (4), 469-475.
- STEYRER, G. (2007): Trocken- und Hitzeschäden brachten „frühen Herbst“. *Forstschutz Aktuell*, 41, 32-34.
- STOLL, M., SCHULTZ, H. R. & BERKELMANN-LOEHNERTZ, B. (2008): Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status. *Functional Plant Biology*, 35, (4), 281.
- STREFELER, M. S. & QUENÉ, R.-J. W. (1995): Variability in Water Loss Patterns of New Guinea *Impatiens* Cultivars and Breeding Selections. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120, (3), 527-531.
- TAHIRO, E. (2002): Untersuchungen von Sommerweizengenotypen unterschiedlicher Herkunft auf Hitze- und Trockenstresstoleranz. Dissertation, Landwirtschaftlichen Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. (2007): *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Publishers.
- TAKAHASHI, S. & BADGER, M. R. (2011): Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. *Trends in Plant Science*, 16, (1), 53-58.
- TAY, A. C., ABDULLAH, A. M., AWANG, M. & FURUKAWA, A. (2007): Midday depression of photosynthesis in *Enkleia malaccensis*, a woody climber in a tropical rainforest. *Photosynthetica*, 45, (2), 189–193.
- TESCHE, M. (1995): Stress bei Pflanzen: Allgemeine und historische Aspekte. in: B. HOCK & E. F. ELSTNER. *Schadwirkungen auf Pflanzen*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford.
- TESTER, M. & BACIC, A. (2005): Abiotic stress tolerance in grasses. From model plants to crop plants. *Plant Physiology*, 137, (3), 791-793.
- TEVINI, M. (1993): *UV-B radiation and ozone depletion: effects on humans, animals, plants, microorganisms, and materials*. Lewis Publishers.

- TEVINI, M. & TERAMURA, A. H. (1989): UV-B effects on terrestrial plants. *Photochemistry and Photobiology*, 50, (4), 479-487.
- TREDER, J. & NOWAK, J. (2001a): The effect of irrigation frequency on growth, flowering and stomatal conductance of *Osteospermum* 'Denebola' and New Guinea *Impatiens* 'Timor' grown on ebb-and-flow benches. *Acta Agrobotanica*, 52, (2), 59-68.
- TREDER, J. & NOWAK, J. (2001b): Evapotranspiration of *Osteospermum* 'Denebola' and New Guinea *Impatiens* 'Timor' grown on ebb-and-flow benches as affected by climate conditions and soil water potential. *Acta Agrobotanica*, 45, (2), 47-57.
- VALLADARES, F., WRIGHT, S. J., LASSO, E., KITAJIMA, K. & PEARCY, R. W. (2000): Plastic Phenotypic Response To Light Of 16 Congeneric Shrubs From A Panamanian Rainforest. *Ecology*, 81, (7), 1925-1936.
- VON WILLERT, D., MATYSSEK, R. & HERPPICH, W. (1995): *Experimentelle Pflanzenökologie*, Stuttgart, New York.
- VU, C. V., ALLEN, L. H. & GARRARD, L. A. (1981): Effects of supplemental UV-B radiation on growth and leaf photosynthetic reaction of soybean. *Physiologia Plantarum*, 52, 353-362.
- WACKER, R. (2006): Eine neue und einfache Methode zur polychromatischen Anfärbung von Paraffinschnitten pflanzlicher Gewebe für Durchlicht- und Fluoreszenzmikroskopie. *Mikrokosmos* 95, 4, 210-212.
- WALZ GMBH, H. (2005): Portable Gas Exchange Fluorescence System GFS-3000 - Handbook of Operation. <www.zealquest.com/upload/product/walz/broschueres-soft/gfs-3000_1e.pdf>, 27.04.2012.
- WANG, D. & GARTUNG, J. (2010): Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 97, (11), 1787–1794.
- WEIHER, E., VAN DER WERF, A., THOMPSON, K., RODERICK, M., GARNIER, E. & ERIKSSON, O. (1999): Challenging Theophrastus: A common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of Vegetation Science*, 10, (5), 609-620.
- WEILER, E. W. & NOVER, L. (2008): *Allgemeine und molekulare Botanik*. Thieme, Stuttgart, New York.
- WESTOBY, M. (1998): A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 199, (2), 213-227.

- WIEBEL, J., CHACKO, E. K., DOWNTON, W. J. S. & LÜDDERS, P. (1994): Influence of irradiance on photosynthesis, morphology and growth of mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) seedlings. *Tree Physiology*, 14, 263–274.
- WILSON, D. & COOPER, J. D. (1968): Effect of Light Intensity During Growth on Leaf Anatomy and Subsequent Light - Saturated Photosynthesis Among Contrasting *Lolium* Genotypes. *New Phytologist*, 68, 1125-1135.
- WITUSZYŃSKA, W. & KARPIŃSKI, S. (2013): Programmed Cell Death as a Response to High Light, UV and Drought Stress in Plants. in: *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture*. InTech, Croatia.
- YANG, Y. Q. & YAO, Y. (2008): Photosynthetic responses to solar UV-A and UV-B radiation in low-and high-altitude populations of *Hippophae rhamnoides*. *Photosynthetica*, 46, (2), 307–311.
- ZAHN, M. (2005): Pflanzenphysiologische Untersuchungen der nichtparasitären Blattverbräunung der Sommergerste *Hordeum vulgare* L. Dissertation, Fakultät für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- ZHANG, F. F., WANG, Y. L., HUANG, Z. Z., ZHU, X. C., ZHANG, F. J., CHEN, F. D., FANG, W. M. & TENG, N. J. (2012): Effects of CO₂ enrichment on growth and development of *Impatiens hawkeri*. *The Scientific World Journal*, 2012, 1-9.
- ZIMMERMANN, P. & ZENTGRAF, U. (2004): Der Zusammenhang zwischen oxidativem Stress und Blattseneszenz während der Entwicklung von Pflanzen. *Gesunde Pflanzen*, 56, (7-8), 208–217.
- ZOLLINGER, N., KJELGREN, R., CERNY-KOENIG, T., KOPP, K. & KOENIG, R. (2006): Drought responses of six ornamental herbaceous perennials. *Scientia Horticulturae*, 109, (3), 267-274.

Anhang

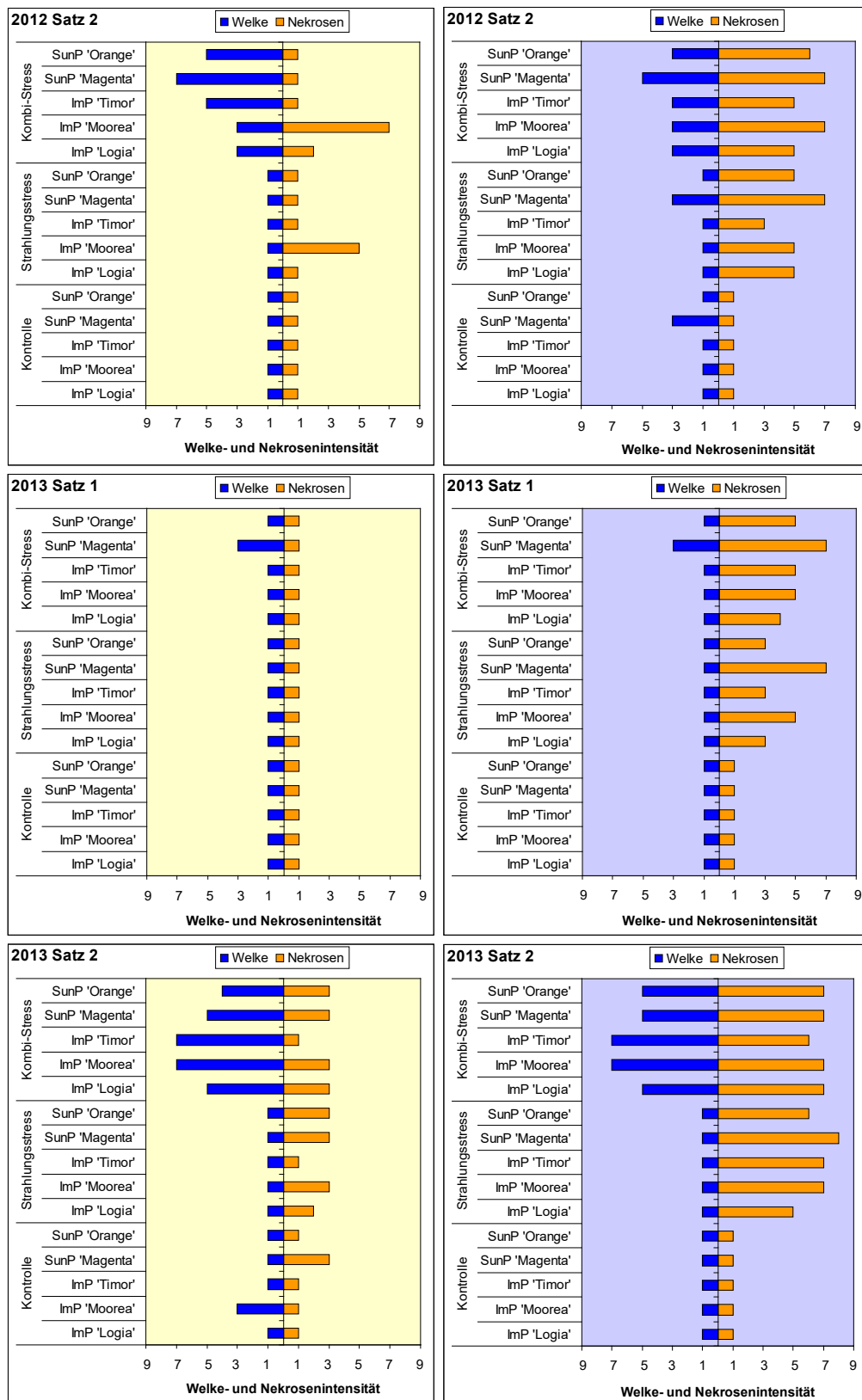


Abb. A 1: Welke- und Nekrosenintensität von verschiedenen *Impatiens*-Sorten aus unshattierter (links) und schattierter (rechte) Anzucht nach sieben Tagen Stressapplikation auf dem Freilandprüfstand

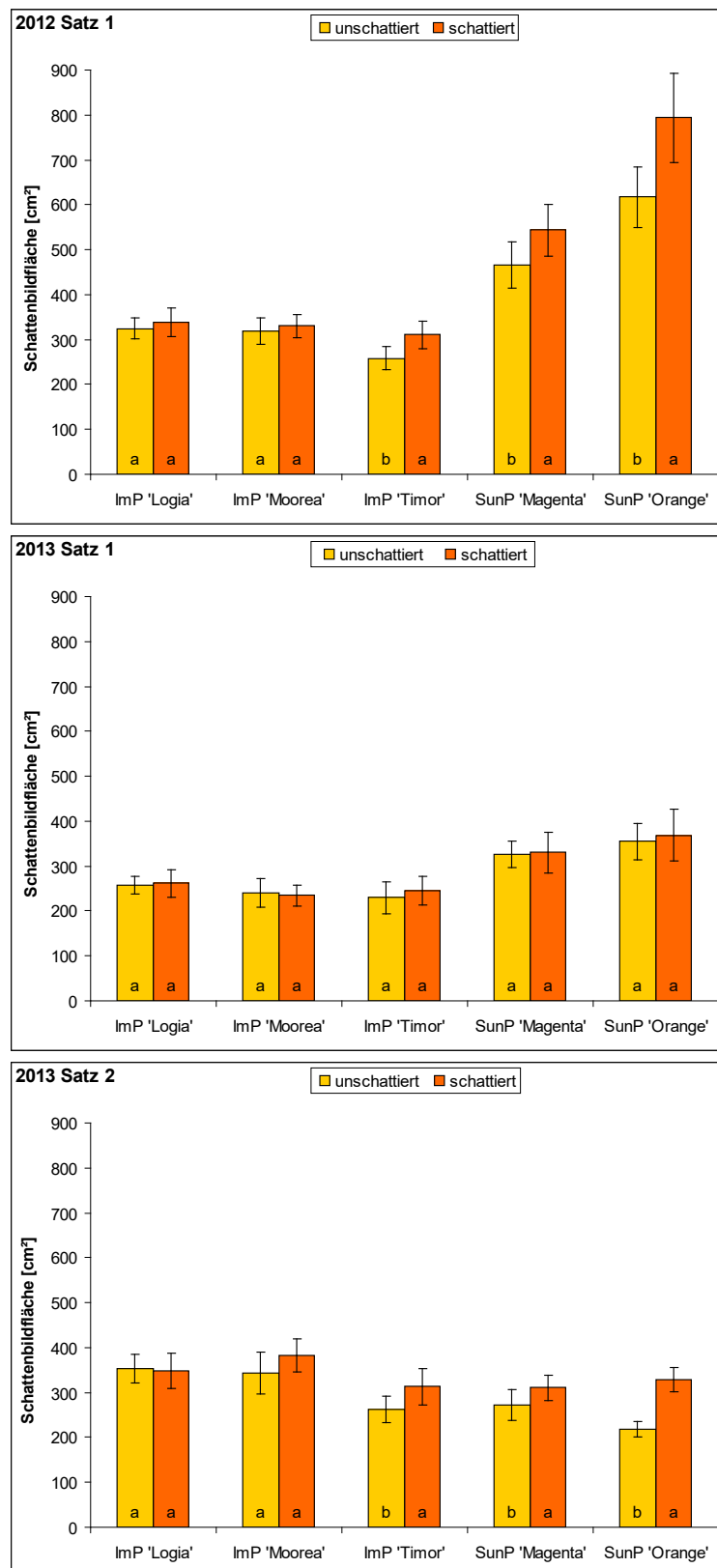


Abb. A 2: Schattenbildfläche verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$)

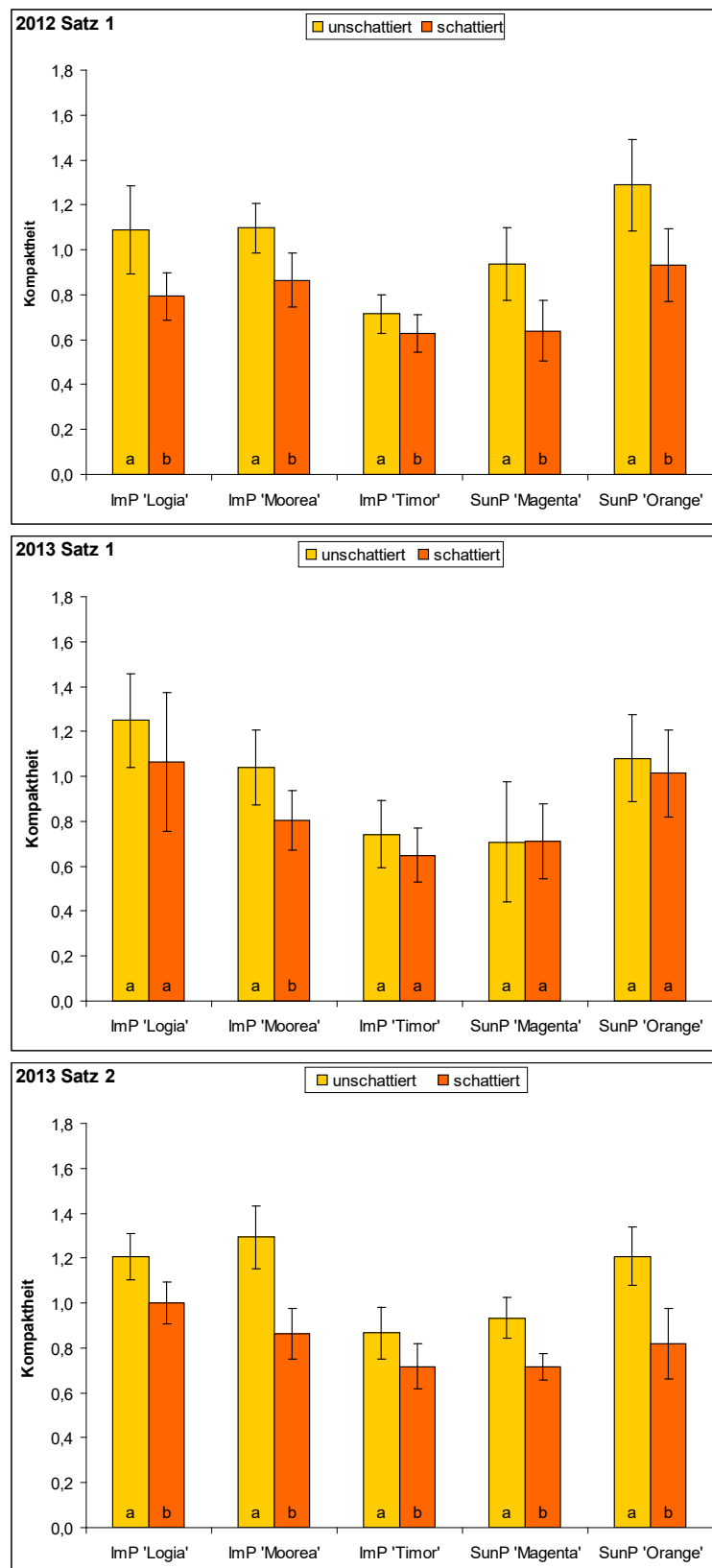


Abb. A 3: Kompaktheit verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 15$)

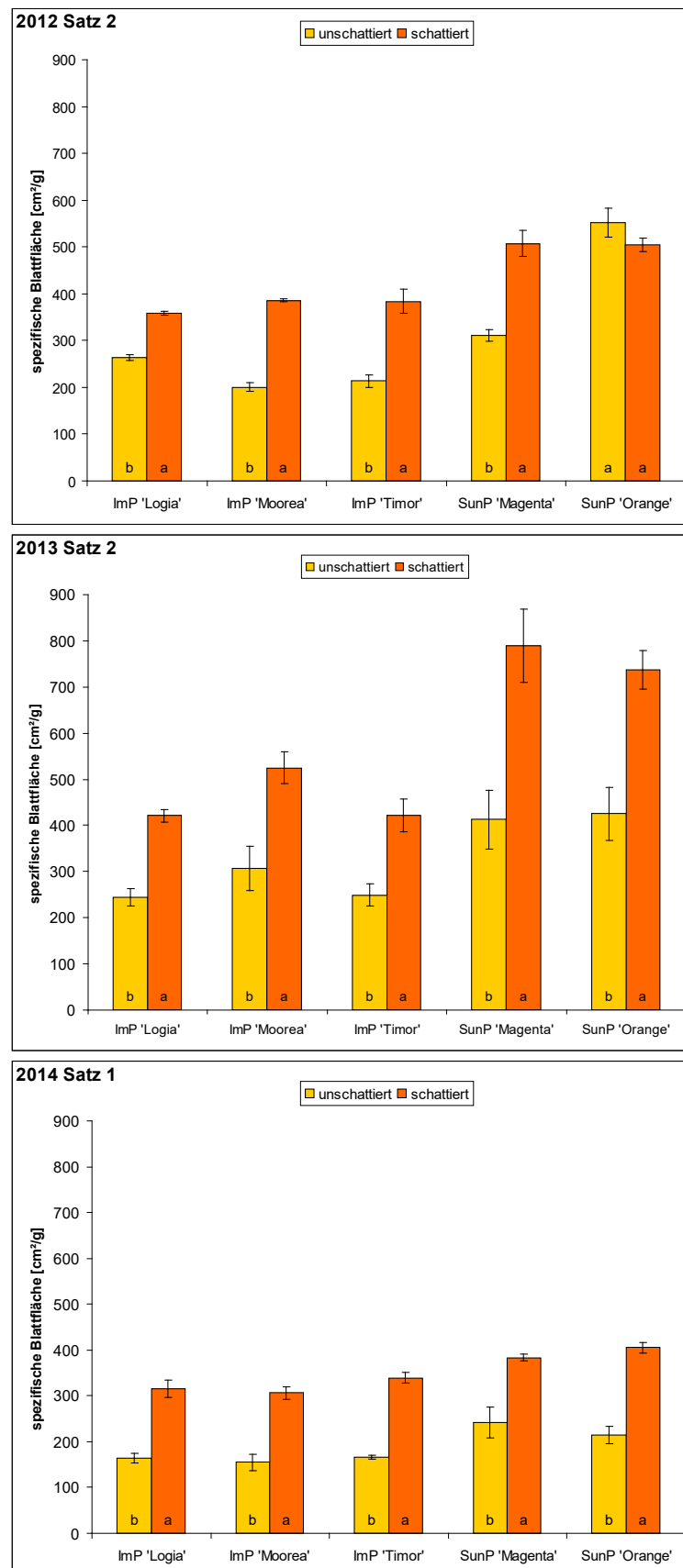


Abb. A 4: Spezifische Blattfläche verschiedener *Impatiens*-Sorten nach 10-wöchiger Anzucht unter verschiedenem Strahlungsangebot (signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; ANOVA, $p < 0,05$, $n = 30$)

Danksagung

Danken möchte ich allen, die auf verschiedene Weise – direkt oder indirekt – zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Ludger Hendriks für sein Vertrauen und die damit verbundene Überlassung dieses Themas. Danke für die angenehme Betreuung durch konstruktive Gespräche auch nach ihrer Pensionierung in Geisenheim und auch in Weisel.

Herrn PD Dr. agr. Heiner Grüneberg für die Chance einer Fachhochschul-Absolventin die Promotion zu ermöglichen und das freundliche Umfeld in Berlin.

Herrn Prof. Dr. Andreas Bettin für die Übernahme des Korreferats. Aber ich danke auch für die Zeit während des Bachelor-Studiums in Osnabrück, die erst dazu beitrug, dass ich mich dem Zierpflanzenbau angenommen habe. Die Trockenstressversuche mit Saintpaulia im ersten Semester waren sehr prägend.

Dem gesamten Zierpflanzenbau-Team der Hochschule Geisenheim für die Hilfe bei den Arbeiten im Gewächshaus, auf der Freifläche und im Labor. Mein spezieller Dank gilt Frau Kerstin Pitzing für die gute Pflege der Versuchspflanzen im Gewächshaus vor der Stressapplikation.

Frau PD Dr. rer. hort. Annette Hohe und Frau Katja Krüger sowie der ganzen Arbeitsgruppe „Nutzung biologischer Systeme im Gartenbau“ des Institutes für Gemüse und Zierpflanzenbau in Erfurt-Kühnhausen für die entgegenkommende Offenheit und Unterstützung bei der Herstellung von Blattquerschnitten. Danke, dass ich in der Zeit ein Teil Eures Teams sein durfte und dass Ihr mir die Zeit in Kühnhausen „versüßt“ habt.

Frau Dr. Sarka Spinarova für die Entlastung in den „Stress-Phasen“ durch die Unterstützung bei Messungen und Bonituren und für die Versorgung mit Eis- und Sonnencreme.

Meinen Eltern, meinen Schwestern und meinem Freund für die finanzielle und moralische Unterstützung während des Studiums und vor allem während der Promotion. Danke für das Verständnis, dass ich nicht nur auf Grund der Distanz, sondern auch aus zeitlichen Gründen nicht immer bei Euch sein konnte. In Gedanken und auch mit dem Herzen war ich immer bei Euch und Ihr bei mir.

Meinen Korrekturlesern Heike Teupe, Pia Sturm, Sandra Klein, Heike Wedde und Hubertus Wedde. Einige Buchstaben und Kommata gingen beim Schreiben verloren. Danke, dass Ihr sie wiedergefunden habt.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Weiterhin versichere ich, dass die Dissertation bisher weder in Teilen noch als Ganzes einem Promotionsverfahren zu Grunde lag.

Goslar, 27. Oktober 2015